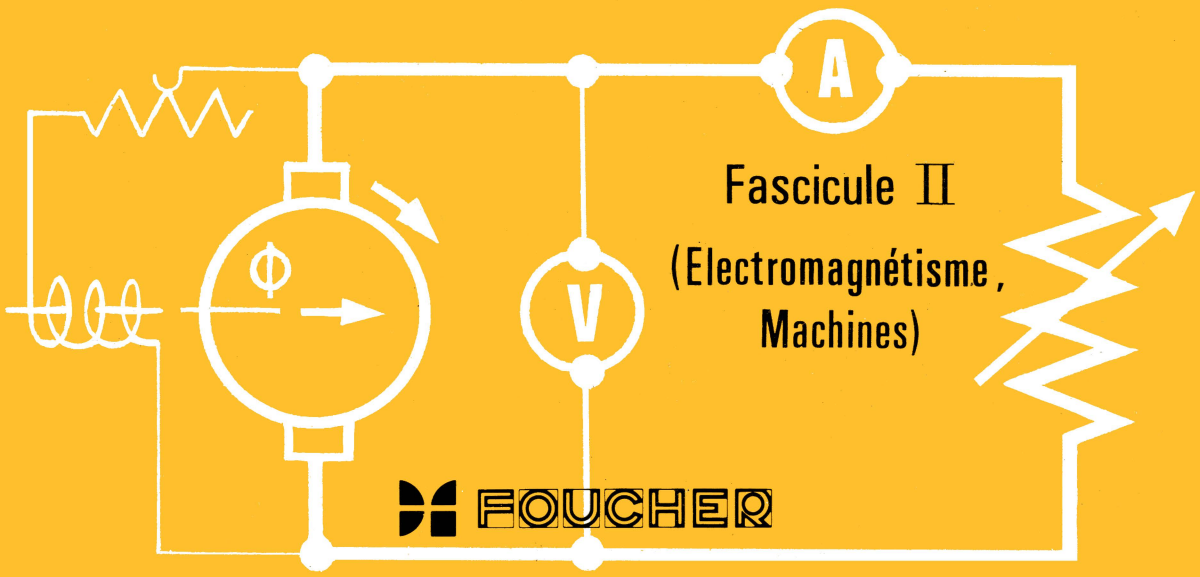
G. THOMASSET

COLLECTION MOUNIC

ELECTRICITE

COURANT CONTINU

Lycées, C.E.S, C.E.T



Fascicule II

(Electromagnétisme, Machines)

FOUCHER

G. THOMASSET

Professeur au Lycée technique d'État
et au Collège d'Enseignement technique de Puteaux.

ÉLECTRICITÉ

COURANT CONTINU

FASCICULE II

Magnétisme — Électromagnétisme
Machines à courant continu

Du débutant au bachelier

NOUVELLE ÉDITION
REVUE ET CORRIGÉE

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli, Paris

Électronique
(Collection MOUNIC)

Semiconducteurs. 1re Partie	par	**MOUNIC**
Semiconducteurs. 2e Partie : *Transistors*		—
Semiconducteurs. 3e Partie : *Thyristors, triacs* . .		—
Transistors - Problèmes avec solutions (3 fascicules).		—
Redressement (2 fascicules)		—
Amplification		—
Travaux pratiques d'électronique (3 fascicules) . . .	par et	**MOUNIC RICARD**
Travaux pratiques d'électronique, fascicule 4.	par et	**MOUNIC RICARD MONFORT**
Impulsions. Techniques de base. Circuits à semi-conducteurs	par	**P. RIVÈRE**
Télévision (2 fascicules).	par	**J. PARDIES**
Servomécanismes (cours)	par	**PEUTEMAN**
Travaux pratiques de servomécanismes	par et	**MONTEILLER PEUTEMAN**
Éléments de théorie de l'Information	par	**J.-P. RIVÈRE**
Les calculateurs numériques		—
Électricité.		
Fascicule 1 : *Courant continu. Électrodynamique.*	par	**THOMASSET**
Fascicule 3 : *Courant alternatif. Lois générales. Condensateur. Inductance*	par et	**MOUNIC THOMASSET**
Fascicule 4 : *Courants triphasés. Machines à courant alternatif. Électronique.* .		—

FOUCHER-Éditeur

Toute représentation, traduction, adaptation ou reproduction même partielle, par tous procédés, en tous pays, faite sans autorisation préalable, est illicite et exposerait le contrevenant à des poursuites judiciaires. (Réf. Loi du 11 mars 1957).
© Les Éditions FOUCHER, 1970.

TABLE DES MATIÈRES

I. — MAGNÉTISME

A - Expériences et définitions 9
B - Propriétés des aimants 10
C - Champ magnétique 14
D - Champ magnétique terrestre 17
E - Action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant 18
F - Applications des aimants 19
G - Exercice résolu 19

Problèmes .....
Lectures techniques ; 1 — Notion de moment magnétique d'un aimant ; 2 — Boussole d'inclinaison 20

II. — ÉLECTROMAGNÉTISME

A - Expériences 23
B - Induction magnétique créée par un courant 25
C - Flux d'induction magnétique 30
D - Exercices résolus 31

Problèmes 32
Lecture technique : Le fluxmètre 34

III. — INDUCTION MAGNÉTIQUE DANS LE FER ET L'ACIER

A - Aimantation du fer et de l'acier 35
B - Courbes d'aimantation 38
C - Cycle d'hystérésis 42
D - Applications et inconvénients de l'hystérésis 46

Problèmes 46
Lectures techniques : 1 — Classification magnétique des corps ; 2 — Les mémoires magnétiques 47

IV. — CIRCUITS MAGNÉTIQUES

A - But des circuits magnétiques 49
B - Analogies entre circuit magnétique et circuit électrique 51
C - Différences entre circuit magnétique et circuit électrique 54
D - Les électro-aimants 55
E - Exercice résolu 57

Problèmes 57
Lecture technique : Applications des relais électromagnétiques 59

V. — ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT

A - Forces électromagnétiques 61
B - Travail des forces électromagnétiques 66
C - Action d'un champ magnétique sur un cadre. Appareils de mesure 68
D - Exercices résolus 72

Problèmes 73
Lectures techniques : 1 — Balance de Cotton ; 2 — Méthode de Poggendorff ; 3 — Sonde à effet Hall 74

VI. — INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

A - Courants induits 77
B - Lois qualitatives de l'induction électromagnétique 79
C - Loi fondamentale de l'induction électromagnétique 80
D - Exercice résolu 82
Problèmes 82

VII. — INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE : CONDUCTEUR MOBILE COUPANT DU FLUX

A - Conducteur rectiligne en translation dans un champ uniforme..... 83
B - Conducteur rectiligne en rotation dans un champ uniforme..... 85
C - Exercices résolus 87
Problèmes 87

VIII. — AUTO-INDUCTION

A - Force électromotrice d'auto-induction 89
B - Inductance d'un circuit 90
C - Calcul de l'inductance d'une bobine longue ou torique 91
D - Rôles et conséquences de l'auto-induction..... 92
E - Exercices résolus 95
Problèmes 96

IX. — COURANTS INDUITS DANS LES MASSES MÉTALLIQUES (Courants de Foucault)

A - Existence et définition 98
B - Propriétés 100
C - Applications des courants de Foucault 101

X. — MACHINES A COURANT CONTINU : GÉNÉRATRICES

A - Principe de fonctionnement 102
B - Réalisation industrielle d'une génératrice bipolaire 105
C - Exemple de réalisation d'un enroulement d'induit 109
D - Relations caractéristiques pour une génératrice bipolaire 111
E - Génératrices multipolaires 114
F - Exercice résolu..... 116
Problèmes 117

XI. — GÉNÉRATRICE A EXCITATION INDÉPENDANTE

A - Caractéristiques de fonctionnement 119
B - Réaction d'induit 127
C - Commutation 128
D - Exercice résolu..... 130
Problèmes 131

XII. — GÉNÉRATRICES AUTO-EXCITÉES

A - Différents types 133
B - Génératrice excitée en dérivation 133
C - Génératrice à excitation composée 142
D - Utilisation des génératrices usuelles 144
E - Exercice résolu..... 145
Problèmes 146

XIII. — MOTEUR A COURANT CONTINU : RELATIONS GÉNÉRALES

A - Réversibilité d'une génératrice 149
B - Force contre-électromotrice d'un moteur 151
C - Puissance utile ; couple utile 153
D - Moteurs multipolaires 156
E - Exercice résolu 157
Problème 157
Lecture technique : Le stroboscope 158

XIV. — MOTEURS A COURANT CONTINU A EXCITATION INDÉPENDANTE

A - Fonctionnement du moteur 159
B - Caractéristiques de fonctionnement 162
C - Alimentation sous tension variable d'un moteur à excitation indépendante 165
D - Emploi du moteur à excitation indépendante 167
E - Exercice résolu 167
Problèmes 168
Lecture technique : Groupe Ward-Léonard 170

XV. — MOTEURS A AUTO-EXCITATION

A - Moteur à excitation en dérivation 171
B - Moteur à excitation en série 175
C - Moteur à excitation composée 177
D - Exercice résolu 179
Problèmes 180
Lecture technique : Freinage électrique 182

XVI. — RENDEMENT DES MACHINES A COURANT CONTINU

A - Rendement d'une génératrice ou d'un moteur 183
B - Méthodes de mesure du rendement d'un moteur 184
C - Génératrice : méthode des pertes séparées 187
D - Exercices résolus 188
Problèmes 189

I. — MAGNÉTISME

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

— Aimants de formes diverses ;
— boussole et aiguilles aimantées sur support ;
— limaille de fer;
— fil de suspension et étrier pour aiguille aimantée ;
— cristallisoir et liège.

A. — Expériences et définitions

1 — Certains corps attirent le fer, l'acier, le nickel.

Cette propriété est bien connue et facile à constater avec certains minerais de fer ou des barreaux d'acier.

Tout corps possédant la propriété d'attirer le fer est appelé un **aimant**.

2 — Aimants naturels. Ils existent sous forme d'*oxyde de fer* (fig. 1) de formule Fe_3O_4 ; ils sont connus depuis l'Antiquité ; les Grecs les extrayaient du sol près de la ville de Magnésia en Asie Mineure d'où le nom de *magnétite* qu'ils reçurent et celui de *magnétisme* attaché aux phénomènes qui en découlèrent.

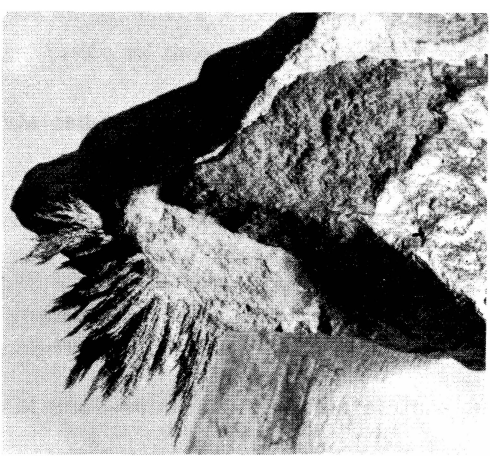


FIG. 1. — **Magnétite** : pierre naturellement aimantée ; observez les houppes de limaille de fer. *(Document Le Matériel d'Enseignement. Photo Ph. Jolly.)*

3 — Aimants artificiels. Ils s'obtiennent en plaçant des barreaux d'acier dans une bobine parcourue par un courant électrique ; l'acier devient un aimant et conserve cette propriété après cessation du courant ; pratiquement ce sont les seuls utilisés, car ils produisent des effets plus intenses que les aimants naturels ; on leur donne diverses formes en fonction de leur emploi : barreau droit, aimant en U (ou en fer à cheval), circulaire, aiguille en losange (fig. 2).

Nous ne considérerons désormais que des aimants artificiels.

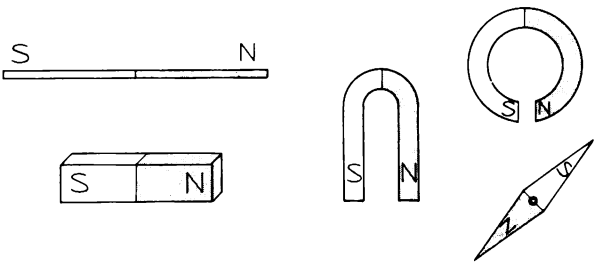


FIG. 2. — Types usuels d'aimants artificiels.

Le **magnétisme** est le chapitre de l'électricité qui étudie les propriétés des aimants (§ B) et des champs magnétiques (§ C).

B. — Propriétés des aimants

1 — Un aimant possède deux pôles.

Plaçons un aimant de l'une des formes usuelles dans de la limaille de fer ; celle-ci s'attache en houppes serrées à chacune de ses extrémités (fig. 3) :

— les régions où s'exerce l'aimantation sont les *pôles ;*

— un aimant possède 2 pôles ;

— la région intermédiaire où n'apparaît pas l'aimantation est dite *zone neutre.*

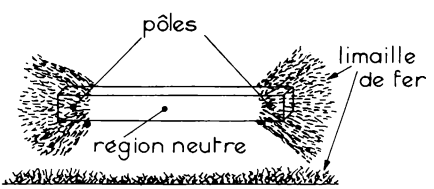


FIG. 3. — Un aimant a deux pôles.

2 — Un aimant mobile s'oriente toujours dans la même direction.

Un barreau droit est disposé sur un bouchon flottant sur l'eau d'une part, une aiguille aimantée est placée en équilibre sur son pivot vertical d'autre part (fig. 4 *a* et *b*), tous deux s'orientent dans une **même direction** qui est sensi-

blement celle Nord-Sud géographique ; écartés de leur position d'équilibre, ils y reviennent fidèlement. C'est toujours le *même* pôle qui se dirige vers le Nord, d'où son nom de **pôle Nord** de l'aimant ; le deuxième pôle s'appelle **pôle Sud**.

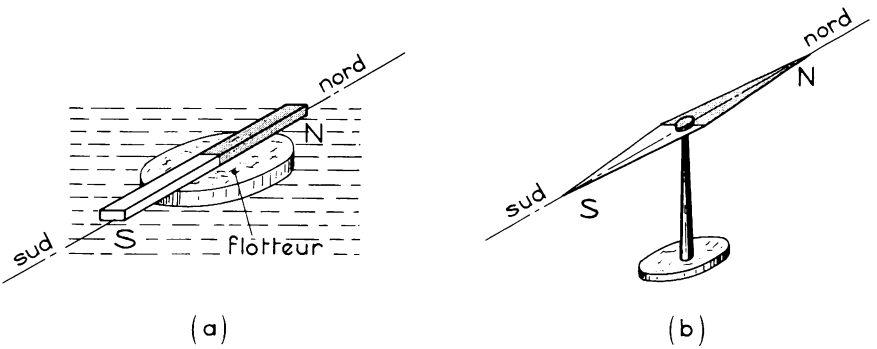


FIG. 4. — L'orientation naturelle d'un aimant est toujours la même : sensiblement la direction Nord-Sud géographique.

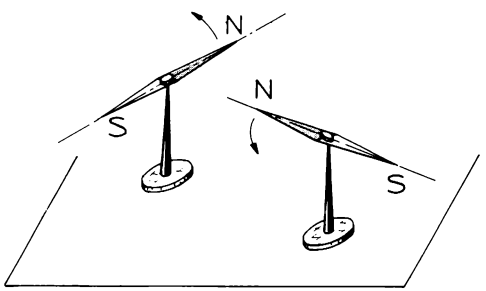


FIG. 5.
Deux pôles de même nom se repoussent.

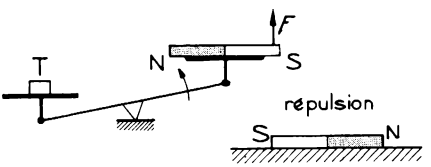


FIG. 6. — L'équilibre de la balance est rompu sous l'action de la force de répulsion *F*.

3 — Un pôle exerce une force magnétique sur tout autre pôle.

Approchons l'un de l'autre deux pôles d'aimant; nous constatons que :

— deux pôles de **même nom se repoussent** (fig. 5 et 6) ;

— deux pôles de **noms contraires s'attirent** (fig. 8).

Nous pouvons préciser cette double action à l'aide d'une balance sensible (fig. 6) ; ainsi par exemple, une balance dont un plateau contient un barreau aimanté, est réglée à l'équilibre ; un deuxième barreau est disposé à une distance *d* de façon à mettre en présence les deux pôles Sud : sous l'effet des forces de répulsion qu'ils exercent l'un sur l'autre, l'équilibre de la balance est rompu; il faut, pour le rétablir,

ajouter dans un plateau une masse marquée m (fig. 7 *a*). En renouvelant l'expérience avec une distance d', supérieure à d, entre les deux aimants orientés dans les mêmes conditions, il faut, pour rétablir l'équilibre, une masse m' beaucoup plus faible (fig. 7 *b*).

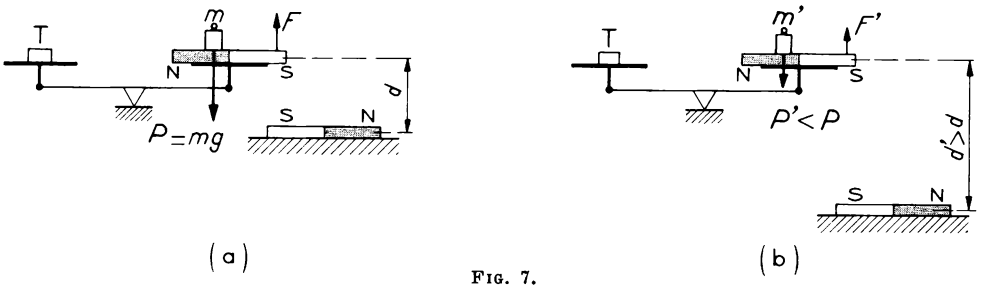


FIG. 7.
a) $P = mg$ compense la force F : l'équilibre est rétabli.
b) La force de répulsion diminue quand la distance augmente : $F' < F$.

Ceci montre que la force magnétique décroît rapidement quand la distance entre les pôles augmente. C'est pourquoi — dans l'expérience de la figure 7 — on peut négliger les forces qui s'exercent entre les pôles N, et celles entre les pôles N et S.

4 — Un aimant n'attire que certains corps.

Approchons un pôle d'aimant de divers matériaux : le fer, le nickel, le cobalt, et leurs alliages (les aciers en particulier) sont attirés ; ces matériaux sont dits « magnétiques » ou « ferromagnétiques ».

Notons que cette action reste sensible même à travers une plaque de verre, de carton ou autres isolants (fig. 8).

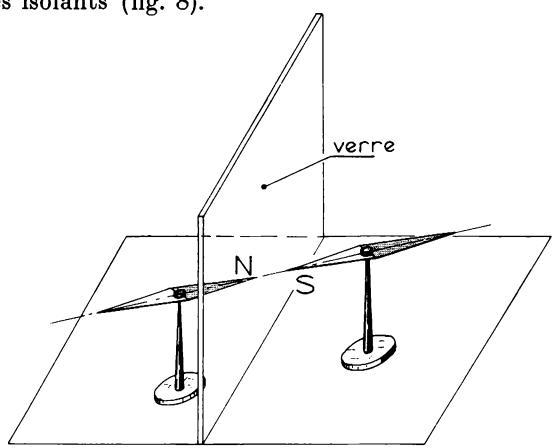


FIG. 8. — Une action magnétique est sensible même à travers un corps isolant : les pôles N et S des aiguilles aimantées s'attirent malgré la plaque de verre.

Les autres corps ne sont pas attirés : ils sont *amagnétiques* (précisions : *Note*, p. 47).

5 — Il est impossible d'isoler un pôle d'aimant.

Scions un barreau aimanté (fig. 9*a*) comme si l'on voulait séparer le pôle Nord du pôle Sud ; nous constatons que chaque moitié est devenue à son tour un aimant *complet :* un pôle de nom opposé à celui existant déjà est apparu à la coupure. Il en est encore ainsi lorsqu'on répète la division, de sorte que l'aimantation est une propriété non des extrémités d'un barreau aimanté, mais de la totalité de sa matière où de très petits domaines aimantés ont été orientés dans le même sens, lors de l'aimantation (fig. 9 *b*).

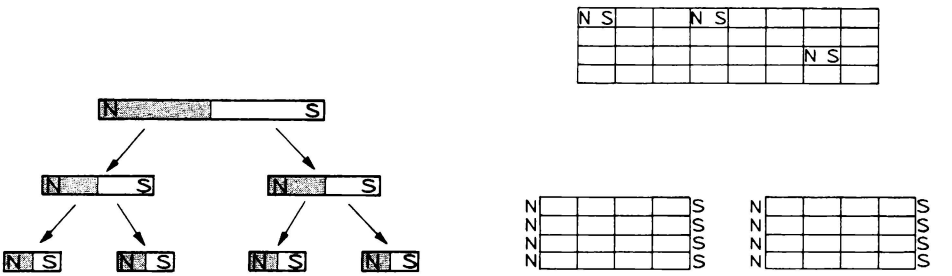


FIG. 9.

a) Chaque élément résultant de la division est à nouveau un aimant complet.

b) Les seuls pôles libres qui manifestent l'aimantation du barreau, sur lesquels s'exercent des forces, sont ceux des extrémités ; dans la région médiane, neutre, il y a compensation de chaque pôle N par un pôle S.

6 — L'aimantation peut être permanente ou temporaire.

Appliquons un pôle d'un barreau aimanté contre un morceau de fer (fig. 10), celui-ci est attiré et à son tour attire la limaille par son extrémité libre : tout se passe comme si le pôle de l'aimant donné se trouvait reporté à l'extrémité du morceau de fer qui le prolonge : on dit que le fer est aimanté *par influence ;* si l'on sépare maintenant ce dernier du barreau aimanté pour le plonger seul dans la limaille, celle-ci n'est plus attirée ; l'aimantation *par influence* réalisée pour le fer est *temporaire* (III, § A).

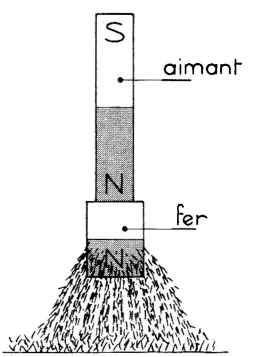


FIG. 10. — L'aimant a reporté son pôle N à l'extrémité du fer.

Reprenons la même expérience avec un barreau aimanté et un morceau d'acier trempé : nous constatons que celui-ci s'aimante et qu'il garde son aimantation une fois séparé du barreau : l'aimantation est *permanente* (III § A).

C. — Champ magnétique

1 — Expérience.

Un aimant est placé sur une table (fig. 11) ; à une distance d très faible, une aiguille aimantée s'oriente, sous l'action de l'aimant, dans le prolongement de celui-ci (A).

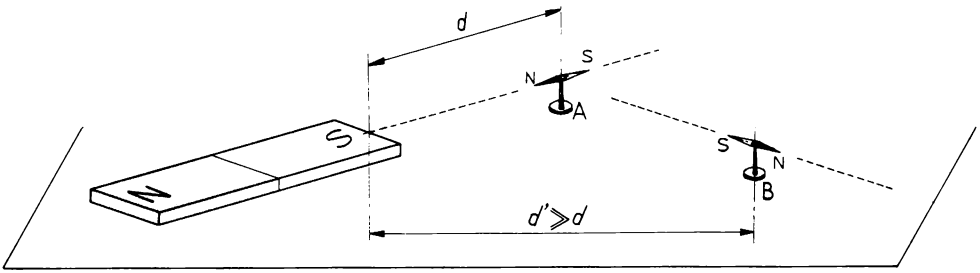


FIG. 11. — En A, au voisinage de l'aimant, l'aiguille s'oriente dans le prolongement N-S de l'aimant ; en B, très éloigné, l'aimant n'a pratiquement plus d'action sur l'aiguille aimantée.

Éloignons-la peu à peu ; au fur et à mesure que la distance qui la sépare de l'aimant croît, l'action devient moins sensible, une légère poussée sur l'aiguille la fait osciller, enfin celle-ci retrouve sa position normale d'équilibre qui est la direction Sud-Nord (B). L'action d'un aimant décroît donc très vite lorsque la distance augmente.

La région de l'espace où se fait sentir l'action d'un aimant est appelée « *champ magnétique* » de cet aimant.

D'une façon plus générale, on appelle champ magnétique *toute région de l'espace où se manifestent des actions magnétiques, telles que l'orientation d'une aiguille aimantée.*

C'est ainsi que la Terre produit autour d'elle un champ magnétique dit *champ magnétique terrestre* (§ D).

2 — Vecteur induction magnétique $\vec{B}$.

a) Reprenons le même aimant ; en un point A, à une distance de 20 cm par exemple du pôle Nord de celui-ci, une aiguille aimantée s'oriente dans la direction de la droite D (fig. 12) ; écartons-la de sa position d'équilibre, elle revient s'immobiliser suivant la même **direction**, celle des forces qui s'exercent sur les pôles : c'est la *direction du champ magnétique* au point A.

b) Maintenons en A l'aiguille aimantée, mais inversons à la main les positions de ses pôles Nord et Sud, de 180° ; dès que nous la lâchons, l'aiguille pivote, oscille pour reprendre sa position initiale, son pôle Sud tourné vers le pôle Nord de l'aimant; en un point tel que A, l'aiguille aimantée, est orientée suivant un **sens** déterminé.

Par convention, le sens Sud-Nord de l'aiguille est le *sens du champ magnétique* en A.

c) Rapprochons de l'aimant l'aiguille aimantée, jusqu'en A′, à une distance de 10 cm par exemple; elle se fige instantanément en un équilibre stable dans la direction D′; pour la faire tourner, il faut la pousser avec une force plus

grande qu'en A. Ces faits montrent que plus l'aiguille est proche de l'aimant, plus les forces sur ses pôles sont grandes : on dit que l'*intensité du champ magnétique* est plus grande en A′ qu'en A. Plus précisément, le rapport des intensités du champ en A′ et A est égal à $\frac{F'}{F}$

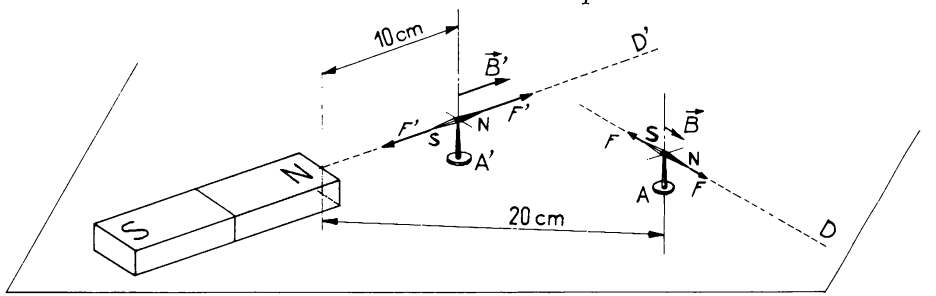


FIG. 12. — Les vecteurs B et B' représentent les directions, sens et grandeurs du champ magnétique aux points A et A′ et $\frac{B}{B'} = \frac{F}{F'}$.

Le champ magnétique en un point possède une direction, un sens, une intensité (ou grandeur) : c'est pourquoi on le représente par un vecteur appelé *vecteur induction magnétique* et noté $\vec{B}$. Cette représentation est en outre justifiée par l'addition (vectorielle) des deux champs.

La valeur de l'induction magnétique (module du vecteur $\vec{B}$) s'exprime en ***tesla*** (symbole T) (1).

3 — Ordre de grandeur d'induction.

On mesure, par exemple avec une sonde de Hall (*lecture*, p. 76) :
— entre les pôles d'un petit aimant B : 0,1 tesla,
— entre les pôles d'un moteur électrique B : 1 à 2 teslas.

Il faut noter que le tesla est une unité assez grande ; c'est pourquoi on utilise parfois un sous-multiple, le gauss (G) :

$$1\ \text{G} = 10^{-4}\ \text{T}.$$

4 — Spectres magnétiques.

Sur un barreau droit, plaçons une vitre et saupoudrons-la de limaille de fer en lui imprimant

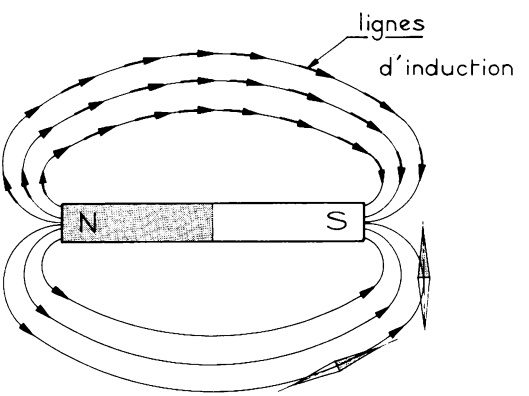


FIG. 13. — Lignes d'induction d'un aimant droit.

(1) TESLA (1856-1943). Savant yougoslave célèbre pour ses travaux sur les courants de haute fréquence.
L'unité « tesla » est encore appelée « weber par mètre carré » (Wb/m²) ; nous le définirons au chapitre VI.

de petits chocs : nous observons que la limaille s'ordonne suivant un ensemble de lignes serrées allant d'un pôle à l'autre ; ces lignes sont très concentrées au voisinage des pôles et s'épanouissent à une certaine distance (fig. 13).

Toutes ces lignes matérialisées par la limaille de fer s'appellent des *lignes d'induction* magnétique.

Les lignes d'induction :

— sont orientées ; elles sortent du pôle Nord de l'aimant et rentrent par le pôle Sud ;

— ne se coupent jamais entre elles ;

— admettent pour tangente en chaque point la direction de l'aiguille aimantée (fig. 14).

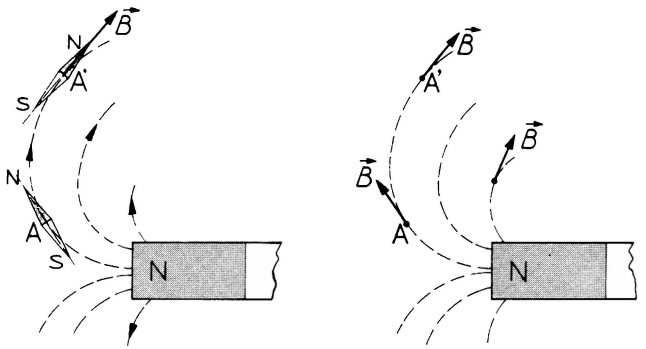
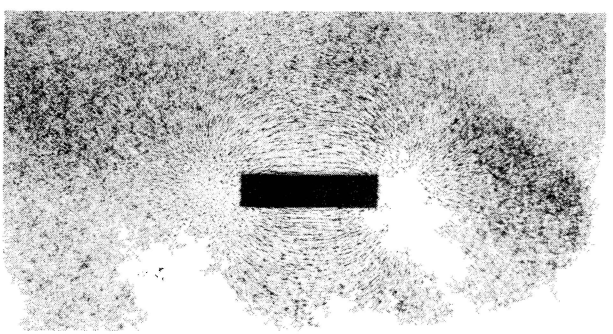
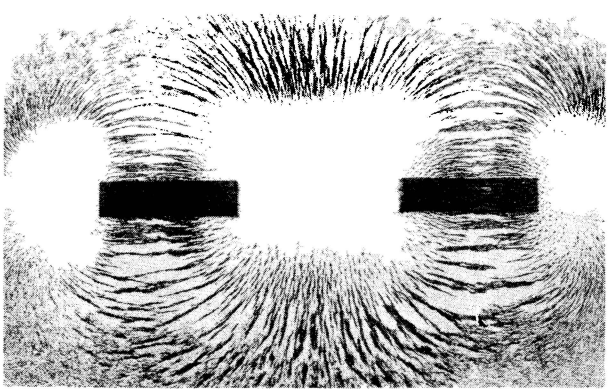


FIG. 14. — Le vecteur $\vec{B}$ est tangent en chaque point d'une ligne d'induction et définit l'orientation de cette ligne.

L'ensemble des lignes d'induction d'un aimant constitue son *spectre magnétique*, dont la forme dépend de celle de l'aimant utilisé ; nous en donnons quelques exemples (fig. 15) ; en particulier, lorsque les lignes d'induction sont parallèles, l'induction B a même direction et même intensité en chaque point : le champ est dit *uniforme*.



Spectre d'un aimant droit.



Spectre de deux aimants droits à pôle de même nom en regard.

(Documents Le Matériel d'Enseignement.)

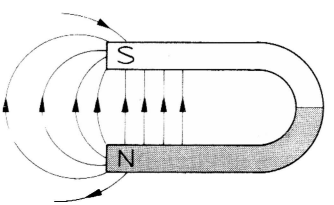


FIG. 15. — Spectre magnétique d'un **aimant en U** : entre les branches, l'induction est uniforme.

D. — Champ magnétique terrestre

1 — Mise en évidence (fig. 16).

Loin de tout aimant et de tout courant, une aiguille aimantée suspendue en son centre de gravité par un fil sans torsion prend toujours la même position d'équilibre ; lorsqu'on la libère dans une position quelconque :

— l'aiguille *tourne* pour se situer dans un plan vertical qui indique approximativement la direction Nord-Sud géographique ;

— l'aiguille *s'incline* dans ce plan d'un angle déterminé.

Il existe donc, autour de la Terre, un champ magnétique puisque toute aiguille aimantée s'oriente : on l'appelle *champ magnétique terrestre.*

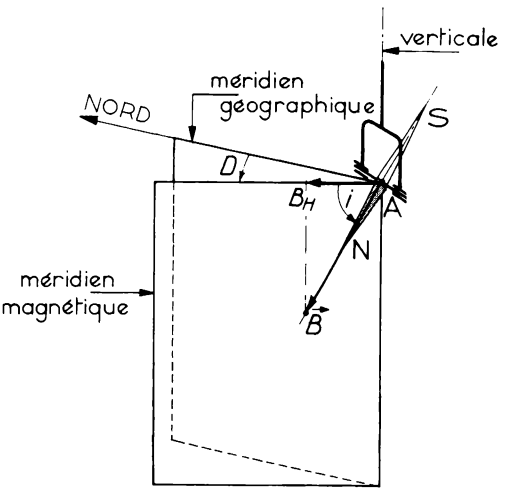


FIG. 16.

Dans une région restreinte, on le considère comme uniforme.

2 — Déclinaison ; inclinaison

— La *déclinaison* (angle D) : c'est l'angle des plans du méridien géographique et du plan vertical du lieu qui contient l'aiguille aimantée, appelé *méridien magnétique.*

— L'*inclinaison* (angle I) : c'est l'angle que fait le plan horizontal avec l'axe magnétique de l'aiguille ; dans notre hémisphère, c'est le pôle Nord qui s'incline vers le bas, ce qui indique le sens du champ magnétique terrestre.

La déclinaison et l'inclinaison dépendent du lieu ; en un même lieu, elles varient lentement avec le temps ; à Paris la déclinaison est actuellement 6° Ouest et l'inclinaison 64°.

3 — Intensité ; composante horizontale.

b) L'intensité (fig. 16) est : $B \simeq 0{,}5 \cdot 10^{-4}$ T ; la composante horizontale a pour valeur $B_h = 0{,}2 \cdot 10^{-4}$ T et oriente l'aiguille aimantée horizontale d'une boussole.

E. — Action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant

1 — L'action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant se réduit à un couple.

Un barreau d'acier non aimanté est suspendu par l'intermédiaire d'un ressort sensible (fig. 17) ; nous repérons sa position d'équilibre et la longueur l du ressort.

Aimantons le barreau : il s'oriente différemment, mais nous constatons :

— la même direction zz' verticale, du fil de suspension ;

— la même longueur l du ressort.

Les forces que le champ magnétique terrestre exerce sur le barreau aimanté n'ont donc ni composante horizontale, ni composante verticale : elles se réduisent à un couple (fig. 18).

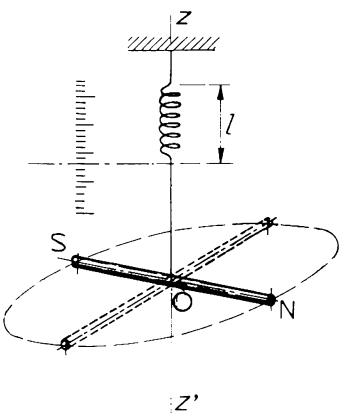


FIG. 17.

REMARQUE. Par contre, dans un champ non uniforme, les forces s'exerçant sur le pôle Nord et sur le pôle Sud ont des directions et des grandeurs différentes ; leur résultante entraîne l'aimant vers les régions où le champ est le plus grand.

C'est ce qui explique aussi l'attraction de la limaille et de petits objets en fer par les aimants, chaque petit objet étant devenu lui-même un aimant (aimantation induite).

2 — Le moment magnétique est une grandeur caractéristique d'un aimant.

Les mesures montrent que le moment M du couple exercé sur un aimant par un champ magnétique uniforme est proportionnel :

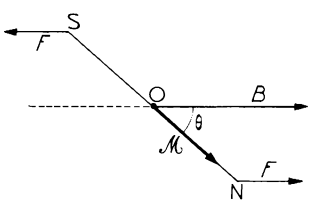


FIG. 18.

— à l'induction B ;

— à une grandeur spécifique des propriétés de l'aimant (propriétés magnétiques, forme, dimensions) appelée ***moment magnétique*** de l'aimant (symbole $\mathcal{M}$; fig. 18) ;

— au sinus de l'angle θ que font l'induction et le vecteur moment magnétique.

3 — Relation et unités.

Ces résultats expérimentaux se résument par la relation :

$$\boxed{M = \mathcal{M}\, B \sin\theta}$$

M en mètre-newton.
B en tesla.
$\mathcal{M}$ en mètre-newton par tesla.

Dans le système international d'unités (système S. I.), pour $M = 1$ m . N, $B = 1$ T et $\sin\theta = 1$, on trouve $\mathcal{M} = \dfrac{M}{B \sin\theta} = 1$ m.N/T.

REMARQUE 1.

Nous verrons (V, § D) que du point de vue de l'action subie dans un champ uniforme, une spire ou une bobine équivaut à un aimant de moment magnétique $\mathcal{M}$; c'est pourquoi l'unité de moment magnétique s'appelle aussi ampère-mètre carré ($A.m^2$).

REMARQUE 2.

Le moment magnétique d'un aimant droit se représente par un vecteur, porté par l'axe SN de l'aimant, et ayant pour sens celui de S vers N (fig. 18).

F. — Applications des aimants

Elles sont multiples :

— Réalisation de boussoles et compas magnétiques, utilisés dans la navigation ;

— Construction d'appareils de mesures : ampèremètre et voltmètre à cadre mobile et aimant, dits appareils magnéto-électriques ;

— Création de champs magnétiques intenses pour l'étude des particules constituant la matière ;

— Production de forces : séparation magnétique des minerais ; polarisation d'écouteur téléphonique... ;

— Autres applications plus élémentaires ; dans le domaine domestique : fermeture des portes, fixation d'objets sur panneaux métalliques...

G. — Exercice résolu

1. *A Paris la valeur de l'inclinaison est sensiblement égale à 64° et la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre est* $0{,}2 \cdot 10^{-4}$ T. *Calculer pour ce lieu la valeur de la composante verticale de l'induction magnétique terrestre.*

Solution.

D'après la figure 17 (§ E), la composante verticale est :

$$B_v = B_h \operatorname{tg} I.$$

Or $B_h = 0{,}2 \cdot 10^{-4}$ T ; $\operatorname{tg} I = \operatorname{tg} 64° = 2{,}05$.

On déduit : $B_v = 0{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}05 \approx 4{,}1 \cdot 10^{-5}$ T.

PROBLÈMES DE LA LEÇON I

1. Un fil de torsion de constante C produit, lorsqu'il est tordu d'un angle α, un couple de rappel $\Gamma = C\,\alpha$, C étant exprimé en mètre-newton par radian.

Une aiguille aimantée horizontale est suspendue par son centre de gravité à l'aide d'un fil de torsion vertical de constante $C = 20 \cdot 10^{-4}$ m.N/rd ; lorsqu'on établit un champ d'induction uniforme d'intensité $B = 4 \cdot 10^{-3}$ tesla, perpendiculaire à la direction de l'aiguille, celle-ci tourne d'un angle $\theta = 45°$.

Calculer le moment magnétique $\mathcal{M}$ de l'aiguille aimantée.

Réponse : $\mathcal{M} \approx 0{,}55$ m.N/T.

2. Une *boussole d'inclinaison* est constituée par une aiguille aimantée mobile autour de l'*axe horizontal* passant par son centre de gravité ; elle peut se déplacer devant un cercle gradué dans un plan vertical. Le système solidaire aiguille et cercle gradué peut également se mouvoir autour d'un axe vertical.

On dispose, dans le plan du méridien magnétique, une boussole d'inclinaison : son pôle Nord indique alors une inclinaison $i = 60°$ et la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre est $B_h = 0{,}2 \cdot 10^{-4}$ tesla.

Sachant que l'aiguille aimantée a pour longueur $l = 15$ centimètres et pour moment magnétique $\mathcal{M} = 0{,}45$ mètre-newton par tesla (mN/T), calculer la force F à exercer à l'extrémité Sud pour la rendre horizontale.

Réponse : $F = 2{,}1 \cdot 10^{-4}$ N $\approx 2{,}1$ cg.f.

LECTURES TECHNIQUES

I. Notion de moment magnétique d'un aimant

1° Angle de torsion.

Un fil de torsion produit, lorsqu'il est tordu d'un angle α, un couple de rappel égal à son couple de torsion :

Pour produire cette torsion, il faut exercer un couple dont le moment C_T par rapport à l'axe est tel que :

$C_T = C\,\alpha$, C est la *constante de torsion* du fil en mètre-newton par radian
α est l'*angle de torsion* en radians.

On trouve expérimentalement que, pour un fil cylindrique, C dépend de la longueur l, du diamètre D du fil et du module μ de rigidité de la substance du fil, ces paramètres étant reliés entre eux par la relation :

$$C = \mu \frac{D^4}{l}.$$

Ce principe trouve son application dans la réalisation des appareils de mesure ; il sert dans l'étude du moment magnétique d'un aimant de la manière suivante :

2° Mesure du moment du couple magnétique exercé par un champ magnétique sur un aimant (fig. 1)

a) Influence de l'angle d'équilibre de l'aimant.

Suspendons par son centre de symétrie O une aiguille rectangulaire SN à un *fil de torsion* et plaçons-la dans un champ d'induction uniforme et horizontale $\vec{B}$,

de façon qu'à torsion nulle du fil de suspension, la position d'équilibre de l'aiguille se confonde avec la direction de $\vec{B}$.

Exerçons une torsion en T à l'aide d'un bouton : à un angle β de rotation repéré par l'index, correspond en O une rotation θ, facilement mesurable, de l'aimant.

Pour la nouvelle position d'équilibre, l'angle de torsion du fil en O est donc : $\alpha = \beta - \theta$ et le moment C_T du couple de torsion est égal au moment du couple magnétique M.

On a :

$$C_T = M = C\alpha. \tag{1}$$

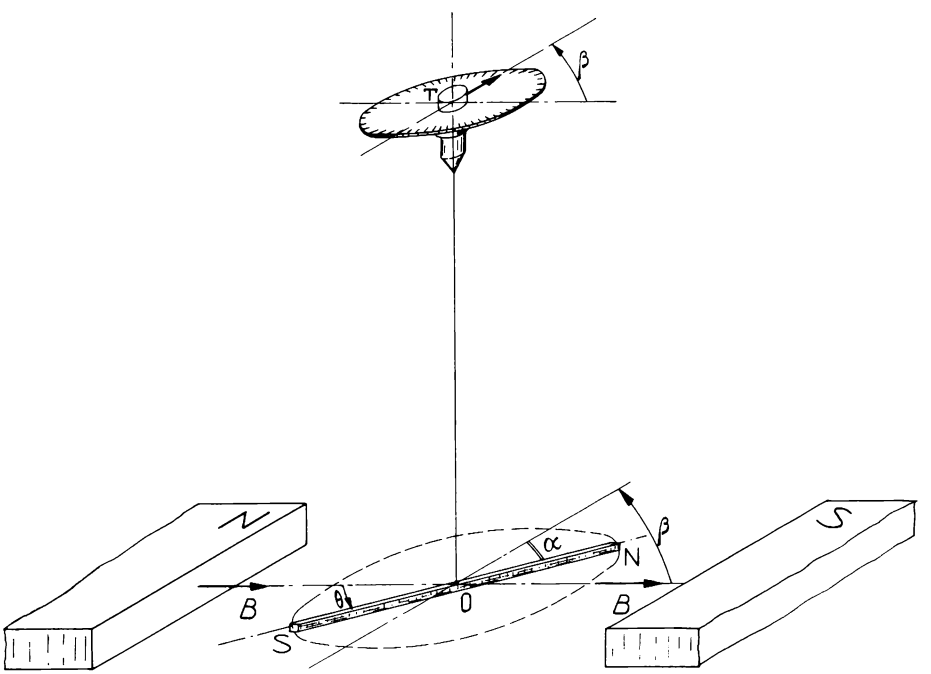
Pour plusieurs valeurs successives de β, on relève les valeurs correspondantes de θ, puis calcule $\alpha = \beta - \theta$; les résultats montrent que l'on a :

$$\sin\theta = K\alpha. \tag{2}$$

En tenant compte de (1) et (2), on obtient :

$$\frac{M}{\sin\theta} = \frac{C}{K} = \text{C}^{\text{te}}.$$

Cette expression montre que le couple magnétique M est proportionnel, en un même point, à $\sin\theta$, θ étant l'angle de l'axe de l'aimant avec la direction de l'induction.



Lectures. FIG. 1.

b) *Influence de l'induction* $\vec{B}$.

La même aiguille aimantée est successivement placée en deux points O_1 et O_2 d'inductions différentes $\vec{B_1}$ et $\vec{B_2}$; pour *obtenir le même angle* θ, il faut que s'exercent des couples M_1 en O_1 et M_2 en O_2, tels que :

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{B_1}{B_2}.$$

Cette relation indique que le moment du couple magnétique est proportionnel à l'induction $\vec{B}$.

c) *Influence propre de l'aimant.*

Pour réaliser la *même* rotation θ au même point O, en utilisant deux aiguilles aimantées différentes, on doit réaliser des torsions du fil différentes, auxquelles correspondent des valeurs du moment du couple magnétique M_1' et M_2'.

Il existe donc une grandeur caractérisant les propriétés magnétiques de l'aimant que l'on appelle *moment magnétique* ($\mathcal{M}$) de l'aimant.

Pour les deux aiguilles, on peut écrire :

$$\frac{M_1'}{M_2'} = \frac{\mathcal{M}_1}{\mathcal{M}_2}.$$

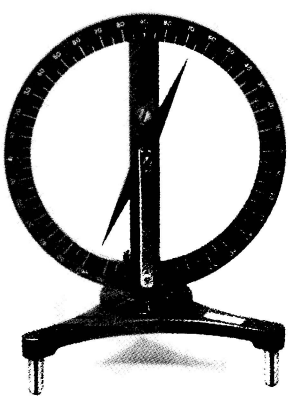
Cette relation montre que le couple magnétique est proportionnel au moment magnétique de l'aimant utilisé.

L'ensemble des résultats obtenus est résumé par la formule $M = \mathcal{M} B \sin \theta$.

2. Boussole d'inclinaison

Elle est constituée par une aiguille aimantée d'axe horizontal, se déplaçant dans un plan vertical en face d'un cercle gradué. Cadran et aiguille aimantée sont solidaires, mais peuvent ensemble se mouvoir autour de l'axe vertical de leur support commun.

La mesure de l'inclinaison se fait par lecture directe sur le cercle gradué, après avoir disposé le plan de l'aiguille dans le plan du méridien magnétique.



Boussole d'inclinaison.
(Document EUROSAP-Deyrolle.)

II. — ÉLECTROMAGNÉTISME

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL:

— source de 12 volts ;
— tige de cuivre sur support;
— aiguille aimantée ;
— conducteur rectiligne ;
— conducteur circulaire ;
— solenoïde (200 spires ; fil de 15/10 mm)
— pièce de fer ;
— limaille de fer ;
— rhéostat.

L'électromagnétisme est le chapitre de l'électricité qui étudie :

1° *L'action des courants sur les aimants, c'est-à-dire les champs magnétiques créés autour d'eux par les courants.*

2° *Inversement l'action des aimants sur les courants, c'est-à-dire les forces exercées par les champs magnétiques sur les courants.*

3° *L'induction électromagnétique, c'est-à-dire la production d'une force électromotrice par l'action d'un champ magnétique sur un circuit* (1).

REMARQUE.

L'action d'un courant sur un autre courant constitue le paragraphe particulier de l'électrodynamique.

L'électromagnétisme trouve ses applications dans les machines électriques : moteurs, générateurs, accélérateurs de particules..., et dans de nombreux autres dispositifs : électro-aimants, relais...

A. — Expériences

I. — UN COURANT FAIT DEVIER L'AIGUILLE AIMANTÉE (2)

Tendons un fil de cuivre parallèlement à une aiguille aimantée (fig. 1 *a*), à quelque distance de celle-ci :

(1) Cette définition est précisée dans la leçon VI.
(2) Les divers effets du courant électrique ont été mentionnés au fascicule I, leçon IV.

— Faisons passer un courant I de A vers B (fig. 1 *b*) : l'aiguille aimantée dévie aussitôt et prend une position d'équilibre faisant un angle α avec sa position initiale, le pôle Nord se dirigeant vers l'arrière, le pôle Sud vers l'avant.

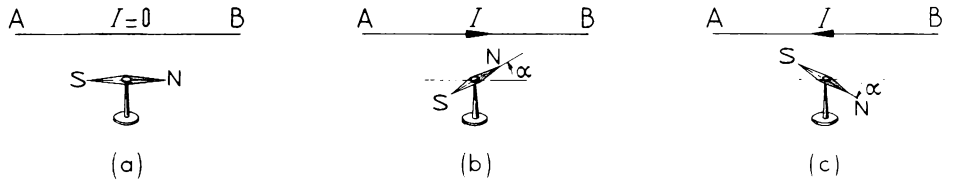


Fig. 1. — **Expérience d'Oersted** (1). Elle prouva pour la première fois, en 1819, qu'un courant, comme un aimant, crée autour de lui un champ magnétique.

— Coupons le courant : l'aiguille reprend sa position initiale.
— Inversons le sens du courant (fig. 1 *c*) : la déviation s'inverse aussi mais conserve la même valeur.
— Répétons la même expérience mais en augmentant l'intensité du courant à l'aide d'un rhéostat : la déviation croît en même temps que l'intensité.

2. — INTERPRÉTATION DES EXPÉRIENCES PRÉCÉDENTES

Tirons les conclusions des observations que nous venons de faire, considérées dans le même ordre :

— Le courant crée, dans le voisinage du conducteur, un *champ magnétique* semblable à celui d'un aimant ; il faut donc considérer le vecteur induction $\vec{B}$ de ce champ, comme il a été fait pour celui d'un aimant.
— Le champ disparaît en même temps que le courant : il a donc la même durée que le courant.
— Le sens de l'induction s'inverse avec le sens du courant.
— L'induction augmente avec le courant : en effet l'induction qui fait dévier l'aiguille est la résultante de l'induction $\vec{B}$ du courant et de l'induction $\vec{B_h}$ du champ magnétique terrestre ; $\vec{B_h}$ est constant, donc $\vec{B}$ augmente avec le courant.

3. — MESURES : NOTION DE PERMÉABILITÉ D'UN MILIEU

Les mesures, par exemple avec une sonde de Hall (2), montrent que l'induction B en un point est proportionnelle au courant et de la forme :

$$B = \mu\, KI,$$

où μ (prononcez *mu*) dépend des unités et du milieu (vide, air, fer...) et K uniquement de la géométrie du système (forme du circuit, position du point par rapport au circuit). Dans le vide, la constante μ du système S.I. s'écrit μ_0 (*mu zéro*) et on a :

$$\boxed{\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}}$$

μ_0 s'appelle ***perméabilité*** du vide ; celle de l'air en est peu différente et on adopte en pratique la même valeur μ_0 pour l'air.

(1) Oersted : physicien danois (1777-1851).
(2) Plaquette de semiconducteur agencée pour délivrer une tension proportionnelle à l'induction qui agit sur elle. Son fonctionnement ne peut être compris qu'après la leçon V (*lecture* 3, p. 76).

B. — Induction magnétique créée par un courant

I. — CAS D'UN CONDUCTEUR RECTILIGNE

a) Expérience : spectre magnétique.

Un conducteur rectiligne (fig. 2) traversant perpendiculairement une feuille de carton recouverte de limaille de fer est parcouru par un courant réglable ayant le sens de la flèche. Le spectre magnétique qui se forme est un ensemble serré de **lignes** d'induction **circulaires** centrées sur le conducteur ; des aiguilles témoins aimantées sont tangentes aux lignes d'induction et le sens de ces lignes est indiqué par la pointe Nord de chaque aiguille ; si l'on inverse le courant, les cercles concentriques subsistent, mais les aiguilles aimantées se retournent de 180° : le sens des lignes d'induction s'inverse.

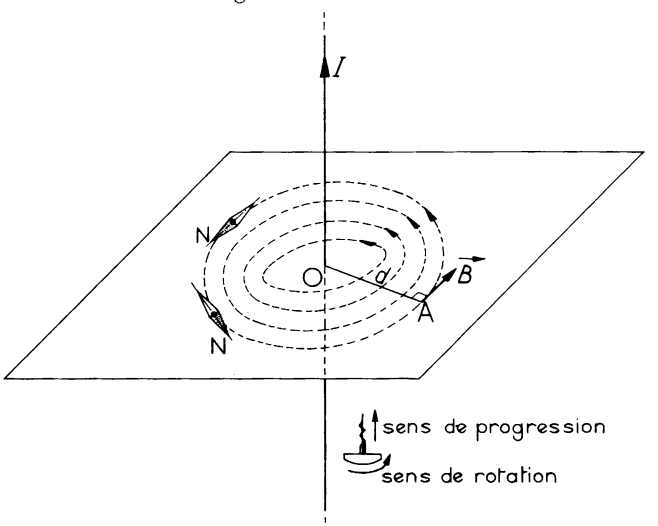


FIG. 2. — Conducteur rectiligne vertical : spectre magnétique.

b) Règles pour déterminer le sens de l'induction.

Elles permettent de préciser la direction et le sens de $\vec{B}$, connaissant celui du courant :

— *Règle du pouce droit :*

La main droite serrant le conducteur de façon que le pouce indique le sens du courant, le sens des lignes d'induction est donné par l'orientation naturelle des autres doigts.

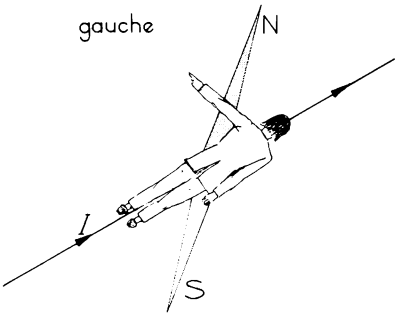


FIG. 3. — Observateur d'Ampère.

— *Règle du tire-bouchon de Maxwell :*
Le sens des lignes de force est celui dans lequel il faut faire tourner un tire-bouchon pour qu'il progresse dans le sens du courant.

— *Règle de l'observateur d'Ampère :*
Un observateur, supposé allongé sur le conducteur, de façon que le courant soit dirigé de ses pieds vers sa tête, voit le pôle Nord de l'aiguille aimantée dévier vers sa gauche (fig. 3).

c) Vecteur induction $\vec{B}$ d'un courant rectiligne indéfini.

En un point A (fig. 2) à la distance d du conducteur, l'intensité du vecteur induction est donnée par la relation :

$$\boxed{B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{d}}$$

B en tesla.
I en ampère.
d en mètre.
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (unités S. I.)

Elle est applicable pour un courant rectiligne indéfini, c'est-à-dire tel que d très inférieure à la longueur l du fil (en pratique $d < 10\ l$). On l'écrit plus usuellement sous la forme $B = 10^{-7}\frac{2I}{d}$. Pour N courants parallèles et voisins : $B = 2.10^{-7}\frac{NI}{d}$.

APPLICATION : $I = 5$ A ; $N = 10$; $d = 5$ cm : $B = 2.10^{-7}\frac{10.5}{5.10^{-2}} = 2.10^{-4}$ T $= 2G$.

2. — CAS D'UN CONDUCTEUR CIRCULAIRE

a) Expérience.

Un tour complet de fil constitue un conducteur circulaire — ou *spire* (fig. 4 *a*). Il traverse en deux points O_1 et O_2 une feuille de carton perpendiculaire au plan de la spire et parsemée de limaille. Établissons un courant dans la spire. Les grains de limaille s'ordonnent suivant des lignes d'induction ; au voisinage immédiat de O_1 et O_2, ces lignes sont pratiquement circulaires, puis de moins en moins courbées au fur et à mesure que l'on se rapproche du centre où elles deviennent rectilignes.

Le sens des lignes d'induction est le sens Sud-Nord de l'aiguille aimantée.

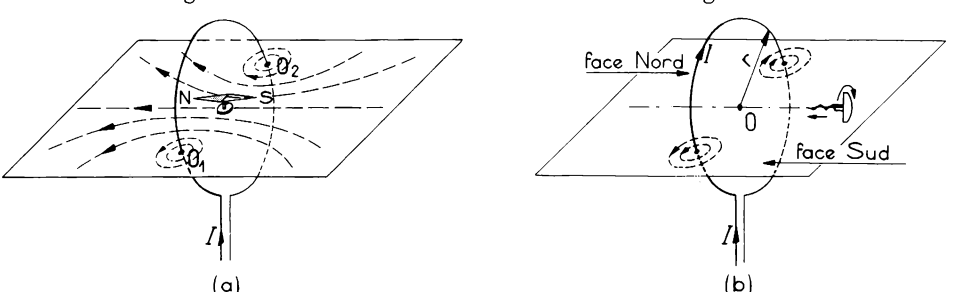


FIG 4.
a) Spectre magnétique d'un conducteur circulaire ou spire.
b) La face Sud est celle par laquelle pénètrent les lignes d'induction.

b) **Règles pour déterminer le sens de l'induction.**

Les règles précédentes du pouce droit, de Maxwell et de l'observateur d'Ampère sont encore applicables.

En remarquant que toutes les lignes d'induction pénètrent par un même côté du plan de la spire, on définit par analogie avec un aimant deux faces (fig. 4 *b*) :

— la face Sud de la spire est celle par où pénètrent les lignes d'induction ;
— la face Nord, celle par où elles sortent.

c) **Induction au centre de la spire.**

Au centre O de la spire circulaire de diamètre D parcourue par un courant I, la valeur de l'induction est donnée par la relation :

$$\boxed{B = \mu_0 \frac{I}{D}}$$

B en tesla.
I en ampère.
D en mètre.
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (unités S. I.)

3. — CAS D'UNE BOBINE PLATE

Lorsque N conducteurs circulaires, de même diamètre D, sont très voisins, ils constituent une *bobine plate.*

Le vecteur induction magnétique est, au centre :

— perpendiculaire au plan de la bobine ;
— orienté de la même façon que pour un seul conducteur circulaire.

Sa grandeur est donnée par la relation :

$$\boxed{B = \mu_0 \frac{NI}{D}}$$

B en tesla.
I en ampère.
D en mètre.
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (unités S.I.).

On notera que c'est par le produit NI qu'interviennent les bobines ; nous préciserons son importance au paragraphe suivant.

EXEMPLE NUMÉRIQUE :

Pour $N = 20$; $I = 10$ A ; $D = 10$ cm, l'induction est $B \approx 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ T.

4. — CAS D'UNE BOBINE LONGUE OU SOLÉNOIDE

a) **Expériences.**

— Un fil conducteur est régulièrement enroulé sur un cylindre isolant ; l'ensemble des spires forme un *enroulement* (fig. 5) appelé *bobine*, défini géométriquement par sa longueur l, son diamètre moyen D et le nombre de couches, chacune d'épaisseur e.

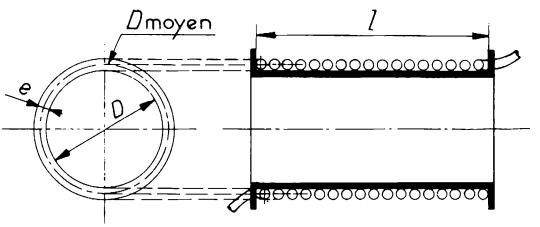


FIG. 5. — Coupe schématique d'une bobine longue ($l \gg D$) à une couche d'épaisseur e. En pratique $l > 10\,D$.

Considérons une telle bobine et disposons, à peu de distance d'une de ses extrémités, une pièce de fer suspendue à la manière d'un pendule (fig. 6 *a*) ; lorsque la bobine est alimentée, le fer est brusquement attiré avec force. Présentons maintenant un même pôle d'une aiguille aimantée (fig. 6 *b*) à une extrémité, puis à l'autre ; nous observons qu'il y a attraction ou répulsion.

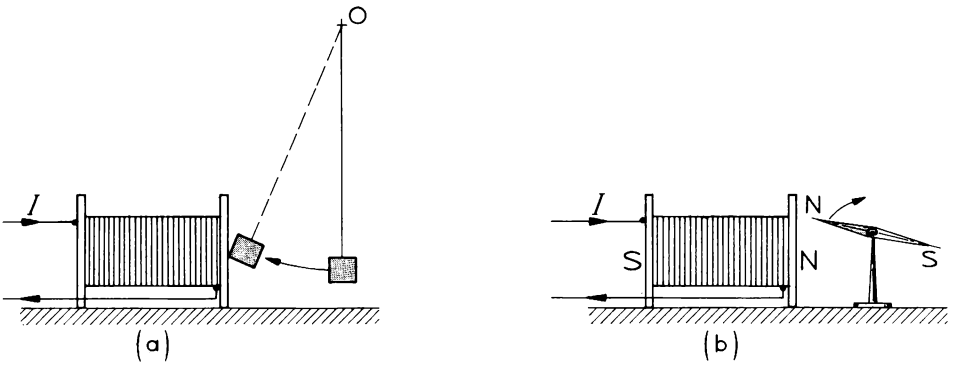


FIG. 6. — Une bobine parcourue par un courant se comporte comme un aimant.

Ces observations montrent que toute bobine parcourue par un courant est comparable à un aimant, avec un pôle Nord et un pôle Sud.

— Réalisons le montage suivant (fig. 7 *a*) : quelques spires de fil conducteur de 15/10 de millimètre traversent un plan cartonné de façon à constituer une bobine cylindrique à spires non jointives, dont une moitié se trouve au-dessus du plan et l'autre en dessous ; de la limaille de fer est répandue d'une manière égale sur toute la surface.

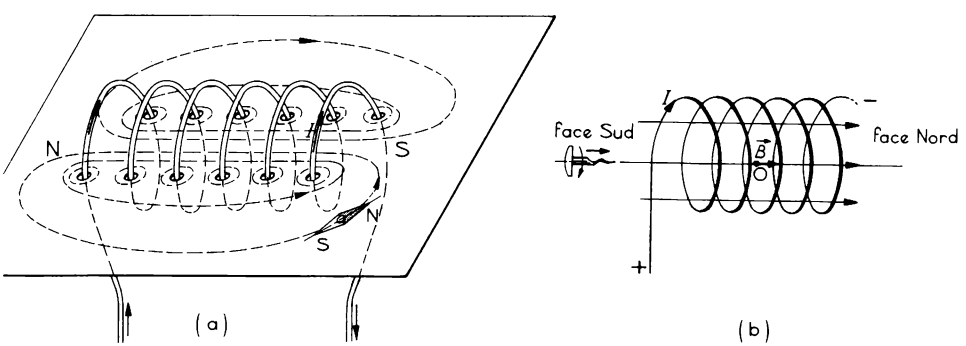


FIG. 7.

a) Spectre magnétique schématisé d'une bobine longue.

A l'intérieur, les lignes d'induction sont parallèles : le champ est uniforme. A l'extérieur, le champ est analogue à celui d'un aimant dont le pôle Nord serait à gauche.

b) Comme pour une spire, la règle du tire-bouchon permet de distinguer la face Nord (ou pôle N) et la face Sud (ou pôle S) d'une bobine.

Alimentons la bobine avec un courant dont l'intensité est réglable : les grains de limaille s'ordonnent aussitôt en files multiples ; nous pouvons, pour faciliter cette opération, frapper légèrement sur le carton ; chaque file, formée de grains de limaille bout à bout, constitue une ligne d'induction magnétique ; l'ensemble matérialise le *spectre* magnétique de la bobine.

b) Lignes d'induction d'une bobine longue.

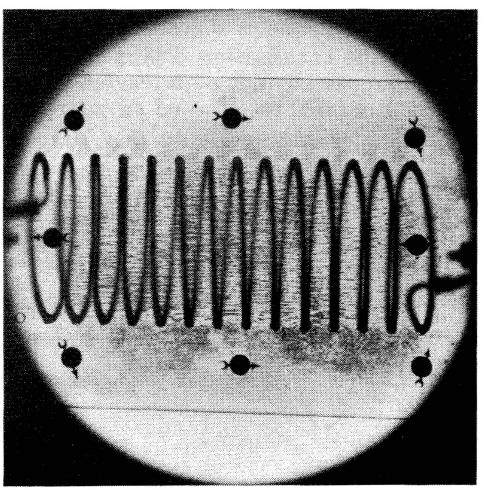
Les lignes d'induction :

— sont parallèles entre elles *à l'intérieur* de la bobine ; le champ y est donc *uniforme*, c'est-à-dire qu'il a partout même direction et même grandeur ;

— s'épanouissent à l'extérieur, en courbes joignant le pôle Nord au pôle Sud, *comme pour un aimant ;*

— sont des courbes *fermées* ne se coupant pas entre elles ; leur sens à l'intérieur est donné par la règle du tire-bouchon ou de l'observateur d'Ampère (§ 1 *b*) ;

— se comporteraient de même façon pour tout autre plan passant par l'axe.



Spectre d'une bobine longue : les petites aiguilles aimantées montrent le sens des lignes d'induction.

(Document Le Matériel d'Enseignement. Photo Ph. Jolly.)

c) Induction à l'intérieur d'une bobine longue.

En un point tel que O (fig. 7 *b*) ou en tout autre point — sauf au voisinage des fils et des extrémités — l'induction B d'une bobine de N spires et de longueur l, pour un courant I la traversant, est donnée par la relation :

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

B en tesla.
I en ampère.
l en mètre.
N nombre total de spires de l'enroulement.
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (unités S. I.)

ou encore : $B = \mu_0 N_1 I$ où $\frac{N}{l} = N_1$ représente le nombre de spires par mètre.

5. — CHAMP MAGNÉTIQUE H (A/m)

On a intérêt, dans certaines questions, à considérer la grandeur $\frac{B}{\mu_0}$; on l'appelle *champ magnétique*, son symbole est H et son unité l'ampère par mètre :

$$\boxed{B = \mu_0 H} \qquad \text{(T, A/m)}$$

Pour la bobine longue, on a donc $H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{NI}{l} = N_1 I$ (voir aussi Pb 8).

H correspond à une excitation magnétique qui provoque l'induction B dans le milieu considéré ; H est la *cause*, indépendante du milieu et B l'*effet*, qui dépend de H **et du milieu.**

C. — Flux d'induction magnétique

1. — DÉFINITION

Dans les questions d'éclairage, on parle du ***flux lumineux*** émis par une lampe. Pour une canalisation d'eau, on dit qu'un ***flux*** de liquide s'écoule ; le débit — volume par seconde — à travers la section droite S (m²) pour une vitesse d'écoulement v (m/s) est $V = vS$ en mètre cube par seconde.

Par analogie, on parle du ***flux magnétique*** à travers une surface S placée dans un champ d'induction $\vec{B}$ (fig. 8 *a*) ; c'est une grandeur physique désignée par le symbole Φ (prononcez « *phi* »).

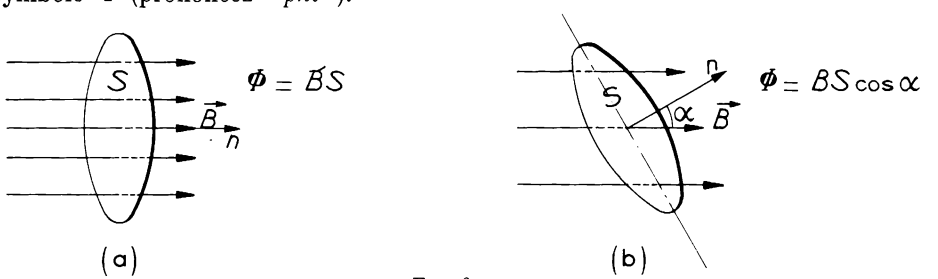


FIG. 8.
a) Flux à travers la spire de surface S, perpendiculaire au champ d'induction.
b) La normale n à la spire et l'induction $\vec{B}$ font un angle α.

Par définition :

Un champ uniforme B *étant perpendiculaire à une surface* S, *on appelle* flux d'induction magnétique *le produit* BS :

$$\Phi = BS. \qquad (1)$$

2. — L'UNITÉ DE FLUX MAGNÉTIQUE EST LE WEBER

La relation de définition du flux définit aussi son unité ; pour $B = 1$ tesla et $S = 1$ mètre carré (système S.I.), on trouve :

$\Phi = 1$ tesla $\times$ mètre carré ou weber [1].

(1) WEBER (1804-1891). Physicien allemand connu pour ses travaux sur l'acoustique et sur les mesures électriques.

Le ***weber*** (Wb) **est le flux qui traverse une surface plane de 1 m², perpendiculaire aux lignes d'induction d'un champ uniforme de 1 tesla.**

$$\boxed{\Phi = BS}$$

Φ en weber.
B en tesla.
S en mètre carré.

3. — FLUX A TRAVERS UNE SPIRE NON PERPENDICULAIRE A L'INDUCTION

Si la normale à la surface S fait un angle α avec la direction de l'induction (fig. 8 *b*), la composante de l'induction normale à la surface est $B_n = B \cos \alpha$; d'après la définition $\Phi = B_n S = (B \cos \alpha) S$; l'expression précédente devient :

$$\boxed{\Phi = BS \cos \alpha} \qquad (2)$$

Φ est la valeur *algébrique* du flux qui entre par la face Sud de la spire; il est :
— maximal pour $\cos \alpha = +1$, c'est-à-dire $\alpha = 0$: $\Phi_{max} = BS$;
— minimal pour $\cos \alpha = -1$, c'est-à-dire $\alpha = \pi$ rd : $\Phi_{min} = -BS$.

Lorsqu'à partir de la position *a* de la figure 8 la spire fait un demi-tour, la variation de flux est donc :

$$\Delta\Phi = \Phi_{max} - \Phi_{min} = 2\,BS.$$

4. — FLUX A TRAVERS UNE BOBINE

Pour une bobine à N spires identiques, chacune d'aire S, il convient de distinguer le flux maximal par spire :

$$\Phi_1 = BS$$

et le flux total à travers les N spires :

$$\Phi_t = N\,\Phi_1 = NBS.$$

(Cette relation sera utilisée dans les mesures au fluxmètre : Leçon III.).

D. — Exercices résolus

1. *Soit un fil rectiligne long parcouru par un courant* $I = 10$ *A allant du bas vers le haut. Indiquer le sens et la valeur du vecteur induction en un point A distant de 2 cm.*

Solution.

$$B = 10^{-7}\,\frac{2\,I}{d} = \frac{10^{-7} \cdot 2 \cdot 10}{2 \cdot 10^{-2}} = 10^{-4}\ \text{T}.$$

2. *Soit une spire circulaire de diamètre* $D = 8$ *cm parcourue par un courant* $I = 2$*A dans le sens des aiguilles d'une montre. Indiquer le sens du vecteur induction au centre de la spire et calculer sa valeur ainsi que celle du champ magnétique.*

Solution.

$$B = \mu_0\,\frac{I}{D} = 4\,\pi \cdot 10^{-7} \times \frac{2}{8 \cdot 10^{-2}} \approx 3{,}1 \cdot 10^{-5}\ \text{T}.$$

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I}{D} = \frac{2}{0{,}08} = 25\ \text{A/m}.$$

REMARQUE. — Pour $I = 1$ A et $D = 1$ m, on trouve $H = 1$ A/m (c'est la définition légale).

3. *Quel est le flux traversant une surface plane* S = *20 décimètres carrés placée dans un champ d'induction uniforme* B = 0,4 *tesla :*

a) *Lorsque la surface est normale aux lignes d'induction?*

b) *Lorsque la normale à la surface fait un angle de 60° avec la direction de l'induction?*

Solution.

a) L'expression du flux est:

$$\Phi = BS = 0{,}4 \times 0{,}2 = 0{,}08 \text{ Wb.}$$

b) $\Phi = BS \cos \alpha = 0{,}4 \,.\, 0{,}2 \,.\, \cos 60^0 = 0{,}4 \times 0{,}2 \,.\, 0{,}5 = 4 \,.\, 10^{-2}$ Wb.

4. *Une bobine comporte* N = *20 spires de section* S = *8 000 cm²; elle est placée dans un champ d'induction uniforme* 0,2 *tesla, perpendiculaire aux spires.*

Calculer le flux traversant cette bobine.

Solution.

L'expression du flux est $\Phi = NBS$:

$$\Phi = 20 \,.\, 0{,}2 \,.\, 0{,}8 = 20 \times \frac{2}{10} \times \frac{8}{10} = 3{,}2 \text{ Wb.}$$

Remarque. — Dans les figures 4 (spire) et 7 (bobine), on oriente la normale aux spires positivement de la face Sud vers la face Nord. Lorsque, en l'absence de courant, on choisit un sens positif *arbitraire* sur la normale, on définit la face Sud et la face Nord.

Si l'induction entre par la face Sud de la bobine, le flux est positif : $\Phi = 3{,}2$ Wb.

Si l'induction entre par la face Nord, le flux est négatif : $\Phi = -3{,}2$ Wb.

PROBLÈMES DE LA LEÇON II

1. Un conducteur rectiligne supposé infiniment long est parcouru par un courant $I = 20$ ampères. A quelle distance d ce conducteur produit-il une induction magnétique égale à la composante horizontale $B_h = 2 \,.\, 10^{-5}$ tesla du champ magnétique terrestre ?

Réponse : $d = 20$ cm.

2. Quelle est l'induction magnétique B créée au centre d'une bobine circulaire plate comportant $N = 50$ spires, de diamètre moyen $D = 10$ centimètres, parcourue par un courant $I = 5$ ampères ? Précisez la direction et le sens de l'induction.

Réponse : $B \approx 3{,}14 \,.\, 10^{-3}$ T.

3. Un solénoïde comporte $N = 1\,800$ spires uniformément réparties sur une longueur $l = 30$ centimètres ; il entretient à l'intérieur des spires, dans l'air, une induction $B_0 = 0{,}015$ tesla, lorsqu'il est parcouru par un courant I. Quelle est l'intensité de ce courant ?

Réponse : $I \approx 2$ A.

4. Un solénoïde de grande longueur et de faible diamètre possède deux couches de spires jointives réparties sur un cylindre en bakélite ; le fil conducteur, isolant compris, a pour diamètre $D = 1$ millimètre. L'enroulement est parcouru par un courant $I = 5$ ampères. Calculer l'induction B_0 à l'intérieur du solénoïde.

Réponse : $B_0 \approx 1{,}26 \cdot 10^{-2}$ T $\approx 0{,}013$ T.

5. Une bobine plate de 10 spires de rayon $r = 3{,}14$ centimètres, est placée dans le plan du méridien magnétique du lieu. Au centre, on place une petite aiguille aimantée montée sur pivot. Quel est l'angle α dont tourne l'aiguille quand le circuit est parcouru par un courant $I = 100$ milliampères ? (On rappelle que la composante horizontale du champ terrestre est $B_h = 0{,}2 \cdot 10^{-4}$ tesla). Précisez le sens de la déviation.

(D'après Bacc. Philo ; Dijon.)

Réponse : $\alpha = 45^\circ$

(déviation occidentale ou orientale par rapport au méridien suivant le sens du courant).

6. On réalise un solénoïde dont les caractéristiques sont les suivantes : nombre de spires $N = 1\,800$, longueur $l = 40$ centimètres, diamètre $D = 8$ centimètres. Calculer lorsqu'un courant $I = 2$ ampères parcourt le solénoïde :

1° Le flux magnétique Φ_1 traversant une section droite du solénoïde.

2° Le flux Φ_2 traversant une bobine plate circulaire composée de $n = 10$ spires, de rayon $r = 2$ centimètres, disposée à l'intérieur du solénoïde, lorsque la normale à sa surface fait, avec l'axe du solénoïde, un angle $\alpha = 60^\circ$.
On prendra : $\pi^2 = 10$.

Réponses : 1° $\Phi_1 \approx 5{,}8 \cdot 10^{-5}$ Wb. 2° $\Phi_2 = 72 \cdot 10^{-6}$ Wb.

7. 1° Un fil de cuivre de 392,5 mètres de longueur et de 2 millimètres de diamètre forme un solénoïde de 3 mètres de longueur et de 5 centimètres de rayon ; la résistivité du cuivre est $1{,}6 \cdot 10^{-8}$ ohm-mètre. On applique, aux extrémités du fil, une différence de potentiel de 20 volts.

a) Quelle est l'intensité de l'induction magnétique $\boldsymbol{B}$ créée au centre de la bobine ?

b) Quelle est la chaleur q dégagée par minute dans la bobine ?

2° Dans une deuxième expérience, un courant constant traverse cette bobine en série avec un voltamètre à sulfate de cuivre. Le flux mesuré dans la bobine est 25 microwebers. Quel est la masse m de cuivre déposée au bout de 10 minutes ?

(Bacc. technique ; Nancy.)

Réponses : 1° a) $B = 5{,}2 \cdot 10^{-3}$ T ; b) $q = 2\,870$ µth. 2° $m = 1{,}18$ g.

8. 1° Déduire, de l'expression de l'induction B du courant rectiligne indéfini, l'expression du champ magnétique H ; calculer le travail $W = Hl$ de ce champ le long d'une ligne de champ, de longueur l, pour un tour complet autour du courant I.

2° Mêmes questions pour un faisceau de N courants I ; le résultat serait-il modifié si l'on remplaçait la ligne de champ par un contour fermé de forme quelconque entourant le faisceau ?

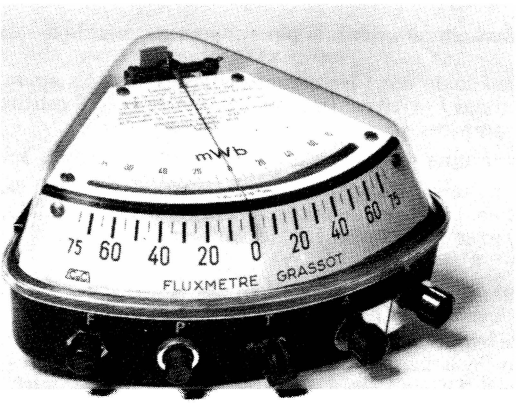
3° Une bobine de longueur l et de N spires est tordue de façon à faire coïncider les deux extrémités : on obtient une bobine torique. Calculer, en appliquant les résultats précédents, le champ magnétique à l'intérieur de cette bobine parcourue par le courant I ; en déduire l'expression de l'induction.

Réponses : 1° $H = \dfrac{I}{2\pi d}$; $l = 2\pi d$; $W = I$ (forme la plus simple du théorème d'Ampère) ; **2° $W = NI$; non** (d n'y figure pas) ; **3° $W = NI = Hl$; d'où H et B** (p. 29) › c'est la démonstration de l'expression de B à partir du théorème d'Ampère.

LECTURE TECHNIQUE

Le fluxmètre

Comme un galvanomètre (1), un fluxmètre comporte un cadre mobile dans le champ magnétique d'un aimant, mais ce cadre n'est pas muni de ressorts spiraux de rappel et il possède un fort amortissement, c'est-à-dire qu'il atteint rapidement son équilibre sans osciller ; cet amortissement est dû au freinage par les courants induits, qui s'opposent au mouvement qui lui donne naissance (p. 80).



Lecture. FIG. 1. — **Fluxmètre.**

(Document C. d. C.)

Lorsqu'on applique une tension croissante aux bornes A et B (fig. 1) de l'appareil, le cadre et son aiguille dévient d'un mouvement régulier ; en l'absence de tension, le cadre reste immobile, dans une position correspondant à une division quelconque du cadran. D'autre part, si dans une bobine, dite *bobine exploratrice* ou *de mesure*, montée aux mêmes bornes A et B, on produit une variation de flux $\Delta\Phi$, la rotation du cadre est proportionnelle à cette variation : le fluxmètre sert donc à mesurer des variations de flux. Le cadran devant lequel se déplace l'aiguille est gradué en weber ; il possède 75 divisions de part et d'autre d'un zéro médian, chaque division correspondant à $2 \cdot 10^{-4}$ weber.

Un bouton poussoir P permet de court-circuiter l'élément de mesure protégé par un fusible F ; la remise à zéro de l'appareil s'effectue à l'aide du bouton poussoir T.

(1) *Voir* leçon V.

III. — INDUCTION MAGNÉTIQUE DANS LE FER ET L'ACIER

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— source de 30 volts (Transtabil);
— solénoïde avec noyau de fer ;
— solénoïde avec noyau d'acier;
— limaille de fer ;
— tore circulaire non coupé et non imprégné en matériau « Imphysil » de $180 \times 140 \times 20$;
— un fluxmètre « Grassot » avec bobine de mesure;
— milliampèremètre;
— inverseur.

A. — Aimantation du fer et de l'acier

1 — Aimantation temporaire du fer doux : électro-aimant.

a) Plaçons dans une bobine un barreau de fer qui dépasse de quelques centimètres aux extrémités, en regard de limaille (fig. 1 *a*). Faisons passer un courant continu dans la bobine : le barreau attire la limaille ; **le fer s'est aimanté**.

b) Coupons le courant : la limaille retombe (fig. 1 *b*).

Le fer a donc une aimantation ***temporaire*** ; l'ensemble noyau de fer doux et bobine constitue un **électro-aimant** capable d'attirer et de relâcher une armature.

c) Si l'on inverse le courant, nous observons un phénomène identique, mais les pôles Nord et Sud sont permutés, ce que l'on vérifie avec une aiguille aimantée.

CONCLUSIONS :

Placé dans un champ magnétique, le fer s'aimante ; cette aimantation disparaît avec le champ et son sens s'inverse avec ce champ.

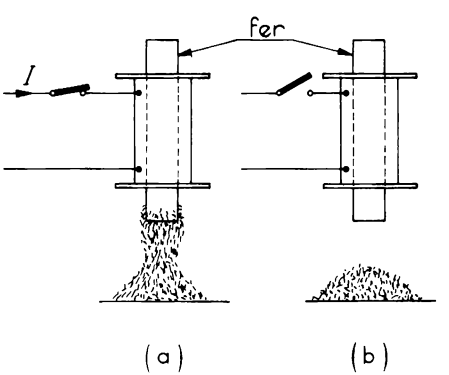


FIG. 1. — Le courant *I* crée une aimantation *temporaire* du fer.

2 — Aimantation *permanente* de l'acier : aimant.

Recommençons la même expérience avec un barreau d'acier trempé ; nous observons que (fig. 2 *a*) :

a) l'acier s'aimante ;

b) l'aimantation subsiste après suppression du courant (fig. 2 *b*) : l'acier a acquis une aimantation *permanente;* il sera utilisé dans la réalisation d'aimants permanents.

c) Les polarités Nord et Sud obtenues aux extrémités du barreau dépendent encore du sens du courant.

CONCLUSIONS :

L'acier s'aimante dans un champ magnétique et reste aimanté après suppression du champ ; l'aimantation s'inverse avec le champ.

REMARQUE 1.

En réalité l'aimantation du noyau de fer doux n'a pas totalement disparu ; il subsiste une légère aimantation dite *aimantation rémanente* qu'une aiguille aimantée permet de déceler ; l'aimantation rémanente joue un rôle important dans les machines électriques.

REMARQUE 2.

Le fer et ses alliages, le nickel, le cobalt, capables de s'aimanter beaucoup plus fortement que les autres corps, sont dits *ferromagnétiques.*

REMARQUE 3.

Le fer et l'acier perdent toute faculté d'aimantation si on les porte à une température voisine de 800 °C (température appelée : *point de Curie*).

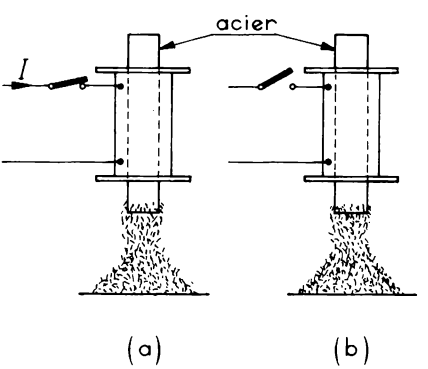


FIG. 2. — Le courant *I* crée une aimantation *permanente* de l'acier.

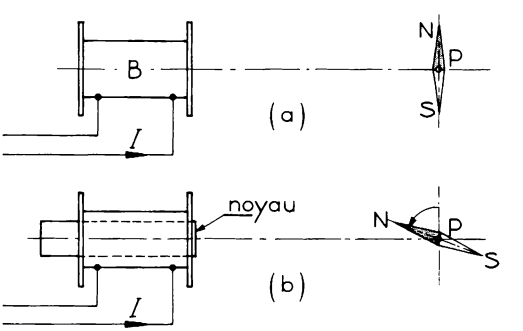


FIG. 3.
a) L'induction est insuffisante pour dévier l'aiguille aimantée.
b) Le noyau augmente l'induction : l'aiguille dévie fortement.

3 - Un noyau ferromagnétique augmente considérablement l'induction créée par une bobine.

Une bobine est parcourue par un courant continu ; plaçons une aiguille aimantée assez loin de la bobine pour qu'elle soit pratiquement orientée Nord-Sud par le champ magnétique terrestre (fig. 3 *a*).

Introduisons un noyau de fer dans la bobine sans modifier le courant (fig 3 *b*) ; l'aiguille aimantée prend aussitôt une nouvelle position d'équilibre : au point P, l'induction due au noyau est devenue très supérieure à l'induction de la bobine sans noyau.

4 — Perméabilité magnétique du fer.

a) EXPÉRIENCE.

Constituons le spectre magnétique d'une bobine longue, puis disposons un morceau de fer en un point de celui-ci (fig. 4) :

les lignes d'induction modifient leur parcours ; elles se resserrent pour pénétrer dans le fer, comme si leur chemin était plus aisé dans le fer que dans l'air ; ceci montre que tout matériau ferromagnétique concentre et canalise un flux magnétique : on traduit cette propriété en disant que la **perméabilité** du fer est plus grande que celle de l'air.

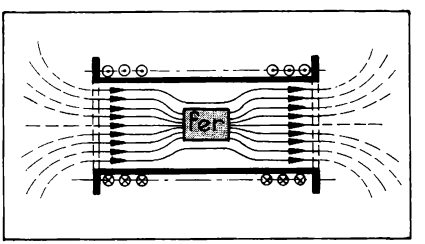


FIG. 4. — Le fer canalise les lignes d'induction : le champ se déforme et se resserre pour suivre le trajet de plus grande perméabilité du fer.

b) COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE RELATIVE PAR RAPPORT A L'AIR.

Si en l'absence de fer, l'induction dans l'air en un point est B_0, elle est devenue B très supérieure à B_0, au même point dans un noyau de fer.

Le rapport : $\frac{B}{B_0} = \mu_r$ est appelé *coefficient de perméabilité relative* du fer par rapport à l'air :

$$\boxed{B = \mu_r B_0}$$

REMARQUE 1.

D'après la définition du champ magnétique, on a $B_0 = \mu_0 H$, donc :

$$\boxed{B = \mu_r \mu_0 H}$$

REMARQUE 2.

La perméabilité d'un matériau ferromagnétique n'est pas constante ; elle est grande quand l'induction est faible et diminue quand l'induction augmente. En outre, pour une même valeur de B, μ_r varie suivant que cette valeur de B a été obtenue par valeurs croissantes ou décroissantes (§ C 2).

B. — Courbes d'aimantation

1 — Mesure de l'induction magnétique B dans un noyau.

Considérons un noyau rectiligne en acier de longueur l et de section circulaire S (fig. 5) et son enroulement de N spires : il est aimanté lorsqu'un courant I circule, l'aimantation étant produite par le champ magnétique, $\frac{NI}{l} = N_1 I$.

a) La bobine de mesure d'un *fluxmètre* (1) étant enfilée sur le noyau, retirons-la brusquement : elle passe d'une région où l'induction est $\vec{B}$ à une région où l'induction est nulle ; la *variation de flux* à travers cette bobine de n spires est donc égale au flux total qu'elle embrassait :

$$\Phi_t = n\,BS.$$

On en déduit l'induction dans le noyau :

$$B = \frac{\Phi_t}{nS}.$$

Pour chaque intensité du courant, on peut donc mesurer la valeur correspondante de B et tracer la courbe $B = f(H)$.

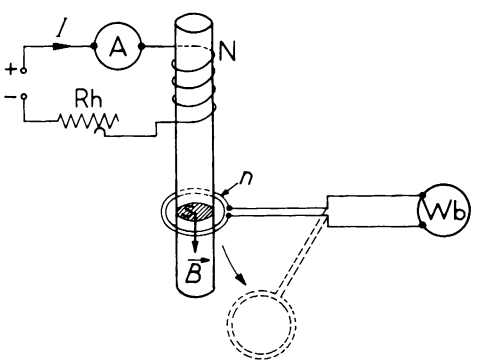


FIG. 5. — Mesure de l'induction d'un noyau rectiligne de longueur l très supérieure au diamètre.

REMARQUE.

La section S est celle à travers laquelle le flux existe : c'est donc la section du barreau et non celle de la bobine de mesure du fluxmètre.

b) EXEMPLE NUMÉRIQUE.

On utilise un barreau rectiligne en acier de diamètre $d \approx 16$ mm, c'est-à-dire de section $S \approx 2 \cdot 10^{-4}$ m^2, et de $N = 480$ spires uniformément réparties.

Chaque division du fluxmètre étant égale à $2 \cdot 10^{-4}$ weber et la bobine exploratrice comportant $n = 50$ spires, on a obtenu, pour les valeurs suivantes du courant, les inductions :

$I = 0{,}1$ A ; variation de flux : 6 divisions ; $B = \frac{\Phi_t}{nS} = \frac{6 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{50 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0{,}12$ T.

$I = 1$ A ; variations de flux : 21 divisions, d'où $B = \frac{21 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{50 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0{,}42$ T.

(1) *Fluxmètre :* voir *lecture technique* leçon II.

2 — Courbe de première aimantation.

a) PRINCIPE DES MESURES.

Considérons un matériau ne présentant *initialement* aucune aimantation (1) ($\vec{B} = 0$; $\Phi = 0$) : un tore circulaire non coupé (fig. 6) de longueur moyenne l, sur lequel sont disposées N spires de l'enroulement magnétisant. Il est alimenté par une batterie d'accumulateurs, en série avec un ampèremètre, un rhéostat et un inverseur K ; sur ce tore, quelques spires, soit n, sont connectées à un fluxmètre et en constituent la bobine de mesure.

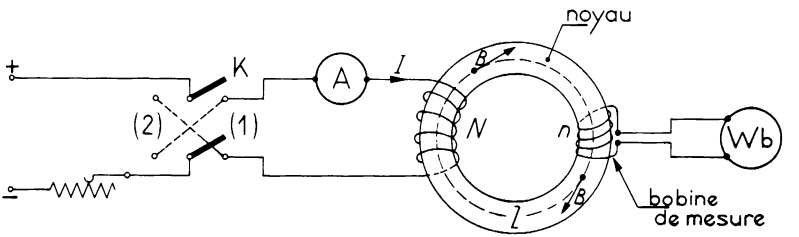


FIG. 6. — Schéma de montage du tore expérimental de longueur (moyenne) l.
Le champ et l'induction magnétiques dans le noyau sont les mêmes. que l'enroulement magnétisant soit concentré (cas de la figure) ou réparti sur tout le noyau : $H = \frac{NI}{l}$; $B = \mu_r \mu_0 H = \mu_r B_0$; B_0 : induction créée dans l'air par le champ H.

Le rhéostat étant à sa position de résistance maximale, fermons l'inverseur K sur la position 1 :

Le courant passe de la valeur 0 à la valeur I_1 et le flux de 0 à Φ_1 ; le fluxmètre traduit la variation $\Delta \Phi_1 = \Phi_1$;

donnons au courant la valeur I_2 supérieure à I_1 ; il en résulte une variation $\Delta \Phi_2$ et le flux devient : $\Phi_2 = \Phi_1 + \Delta \Phi_2$.

De proche en proche nous obtenons, pour des valeurs croissantes du courant dans l'enroulement d'excitation, les valeurs correspondantes du flux à travers le matériau, ce que résume le tableau suivant :

I	0	I_1	$I_2 > I_1$	$I_3 > I_2$	....
$\Delta \Phi$	$\Delta \Phi_1$	$\Delta \Phi_2$	$\Delta \Phi_3$	$\Delta \Phi_4$	....
Φ	0	$\Phi_1 = \Delta \Phi_1$	$\Phi_2 = \Phi_1 + \Delta \Phi_2$	$\Phi_3 = \Phi_2 + \Delta \Phi_3$	$\Phi_4 = ...$

(1) Pour désaimanter un noyau, le placer dans une bobine parcourue par un courant alternatif et diminuer ce courant jusqu'à l'annuler.

De là on déduit la courbe de première aimantation de $B = f(H)$ ou $B = f(B_0)$. La figure 7 donne l'allure d'une telle courbe qui est caractérisée par :

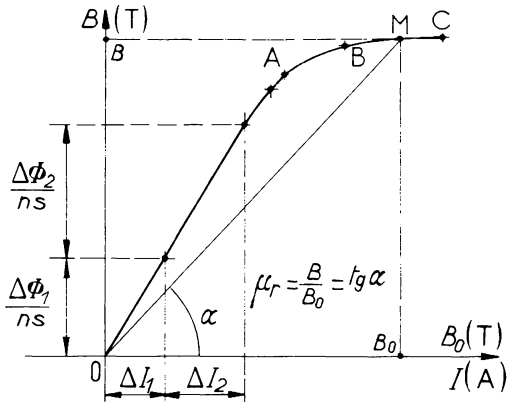


FIG. 7. — Courbe de première aimantation.

— une partie OA rectiligne depuis *le voisinage de l'origine* et de grande pente ; l'induction y croît proportionnellement au courant et au champ ;

— une partie courbe AB ; l'induction croît beaucoup plus lentement et n'est plus proportionnelle au courant et au champ ;

— une partie BC de pente très faible ; tout nouvel accroissement du courant ne modifie pratiquement plus l'induction : on dit que le matériau est *aimanté à saturation* ou *saturé*.

REMARQUE.

En réalité, l'approximation rectiligne de la région OA est peu précise, ce que montrent les figures 8 et 9.

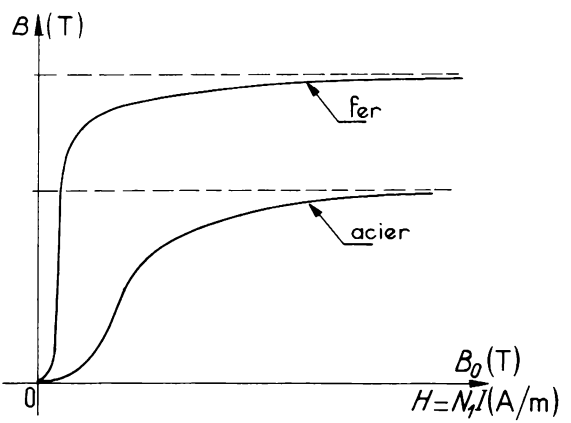


FIG. 8. — Courbe de première aimantation du fer doux et de l'acier.

b) EXEMPLE NUMÉRIQUE.

— *Dispositif expérimental :*

Un tore circulaire feuilleté en alliage fer-silicium à 3,5 % de Si, appelé « Imphysil », a pour dimensions : diamètre extérieur 180 mm, diamètre intérieur 140 mm, section 20 × 20 mm² ; sa longueur moyenne est donc $l = 0{,}14\,\pi = 0{,}50$ m. La bobine excitatrice de ce tore comporte $N = 250$ spires et la bobine de mesure du fluxmètre $n = 10$ spires.

— *Résultats obtenus :*

I (mA)	0	10	20	35	50	70	100
$10^4 \cdot \Delta\Phi$ (Wb)		6	19,2	16,8	7,6	4	3,2
$10^4 \cdot \Phi$ (Wb)	0	6	25,2	42	49,6	53,6	56,8
$H = \frac{NI}{l}$ (A/m)	0	5	10	17,5	25	35	50
$10^4 \cdot B_0$ (T)	0	0,063	0,13	0,22	0,31	0,44	0,63
$B = \frac{\Phi}{nS}$ (T)	0	0,15	0,63	1,05	1,24	1,34	1,42
$\mu_r = \frac{B}{B_0}$	0	$\approx$ 23 800	$\approx$ 48 400	47 700	40 000	30 500	22 500

— *Courbe :*

Le relevé des mesures nous permet de tracer la courbe $B = f(B_0)$ de la figure 9. La valeur du courant de saturation est sensiblement de 100 milliampères.

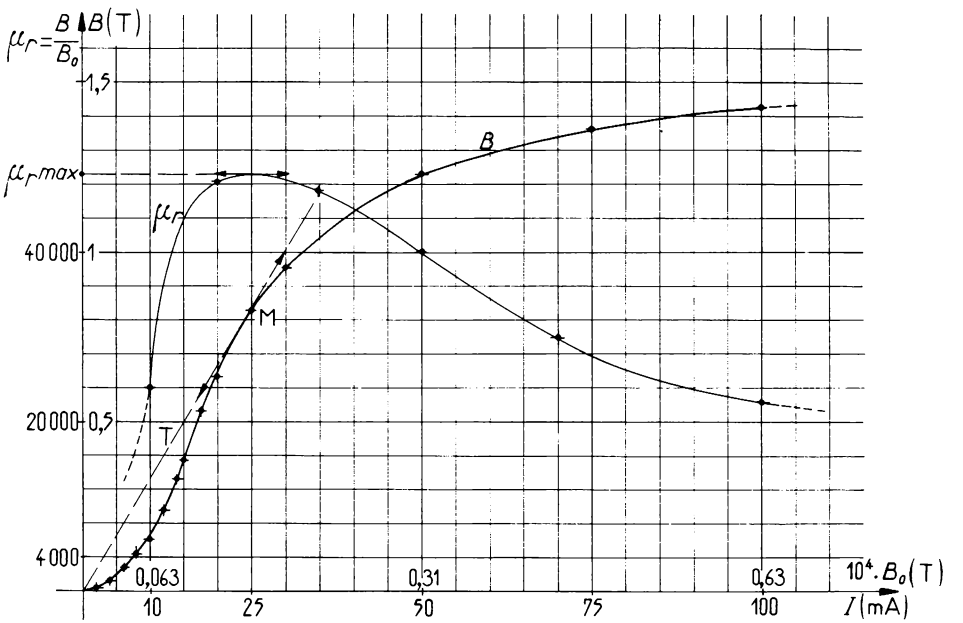


FIG. 9.

Courbe de première aimantation relevée expérimentalement : $B = f(B_0)$.
Courbe de la perméabilité relative : $\mu_r = f(B_0)$; $B_0 = \mu_0 \frac{NI}{l} = \mu_0 H$.

C. — Cycle d'hystérésis

1 — Les matériaux magnétiques présentent un cycle d'aimantation et de désaimantation appelé *cycle d'hystérésis*.

a) Dispositif expérimental de mesure.
Même tore utilisé, même montage que dans la figure 6.

b) Principe des mesures (fig. 10).

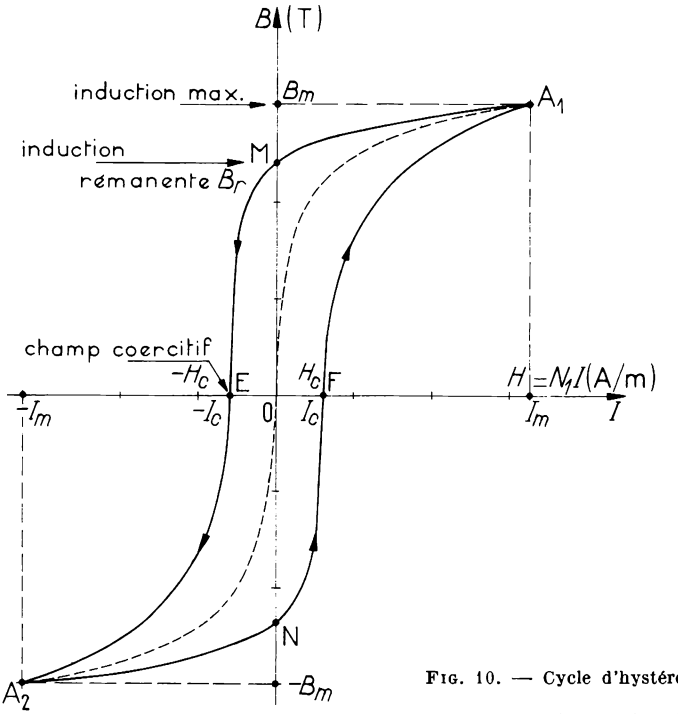


Fig. 10. — Cycle d'hystérésis d'un matériau : principe.

— Dans l'expérience précédente, après avoir atteint l'intensité maximale I_m du courant de saturation correspondant au point A_1, revenons à $I = 0$ par valeurs décroissantes successives ; relevons les variations du flux et déduisons les valeurs correspondantes de l'induction B. Si nous portons, sur un graphique, B en fonction du champ $H = \frac{NI}{l} = N_1 I$, nous obtenons une courbe A_1M qui se trouve au-dessus de la courbe de première aimantation ; pour $I = 0$, $B_r = \overline{OM}$ n'est pas nulle, c'est *l'induction rémanente* du noyau. On dit que le matériau présente un *retard à la désaimantation* ou **hystérésis** (1).

(1) *Hystérésis* = mot grec qui signifie *retard*. *Coercitif* : qui a le pouvoir de coercition, c'est-à-dire de contrainte; le champ coercitif contraint le matériau à perdre l'aimantation.

— Inversons le sens du courant et faisons varier I par valeurs successives de 0 à I_m ; nous traçons la branche de courbe MEA_2 ; l'induction magnétique B décroît et s'annule pour une valeur $\overline{OE} = H_c$, dite **champ coercitif** correspondant au courant I_c ; puis l'induction change de sens et atteint la valeur $-B_m$ pour un courant $-I_m$, le point figuratif A_2 étant symétrique du point A_1 par rapport à 0.

— Les mesures de B, pour les valeurs de I variant de $-I_m$ à $+I_m$, permettent de tracer une branche de courbe A_2NFA_1 symétrique de la précédente. La courbe fermée obtenue est appelée *cycle d'hystérésis.*

2 — Tracé expérimental d'un cycle d'hystérésis (fig. 11).

Relevons le cycle correspondant au matériau utilisé précédemment (§ B).

a) DÉTERMINATION DES EXTRÉMITÉS DU CYCLE.

Adoptons la même intensité maximale $I_m = 100$ mA que pour le tracé de la courbe de première aimantation ; stabilisons le cycle en basculant plusieurs fois l'inverseur :

de la position 1 où le courant est $+I_m = +100$ mA
à la — 2 — $-I_m = -100$ mA.

Le cycle étant ainsi stabilisé, le fluxmètre tourne, lorsqu'on bascule l'inverseur, de 56,8 divisions, correspondant à la variation de flux

$$\Delta\Phi = (2 \cdot 10^{-4}) \times 56{,}8 \text{ Wb.}$$

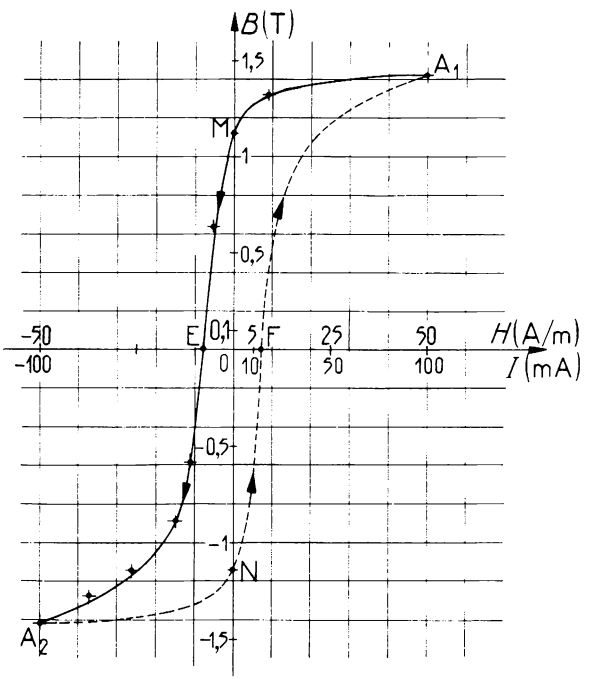


FIG. 11. — Cycle d'hystérésis relevé expérimentalement. 1 division du fluxmètre = $2 \cdot 10^{-4}$ Wb.

Cette variation est produite par la variation de l'induction entre B_m et $-B_m$; à la variation de B entre 0 et B_m correspond :

$$\frac{\Delta\Phi}{2} = 10^{-4} \times 56{,}8 = 5{,}68 \,.\, 10^{-3} \text{ Wb.}$$

On a donc, n étant le nombre des spires de la bobine d'épreuve et S l'aire de la section droite du tore (p. 40) :

$$B_m = \frac{\Delta\Phi/2}{nS} = \frac{5{,}68 \,.\, 10^{-3}}{10 \,.\, (4 \,.\, 10^{-4})} = 1{,}42 \text{ tesla.}$$

D'autre part, pour $I_m = 100$mA, on a :

$$H = \frac{NI}{l} = \frac{250}{0{,}5} \times 0{,}100 = 50 \text{ A/m.}$$

Nous pouvons donc porter les extrémités du cycle sur le diagramme ; ce sont les points A_1 (+ 50 A/m ; 1,42 T) et A_2 (— 50 A/m ; — 1,42 T).

b) Relevé du cycle.

L'inverseur étant en (1), on fait décroître par variations successives brusques le courant de $I_m = 100$ mA à I_1 (soit ΔI_1), puis de 100 mA à I_2 (soit ΔI_2)... jusqu'à $I = 0$, puis l'inverseur placé en (2) de I_m à $-I_3$, I_m à $-I_4$..., etc.

On note les variations successives correspondantes du fluxmètre ($\Delta\Phi$) et déduit celles de l'induction (ΔB), d'où le tableau I.

A chaque valeur du courant I correspond alors une valeur de l'induction B_0 et, pour le tore, une nouvelle valeur de l'induction B par rapport à l'induction maximale B_m de départ, d'où le tableau II.

A titre d'exemple, nous donnons les valeurs obtenues pour la branche A_1MEA_2 du cycle d'hystérésis construit :

ΔI (mA)	$10^4 \,.\, \Delta\Phi$ (Wb)	ΔB (T)
100 à 18	4	0,1
100 à 0	12	0,3
100 à — 10	31	0,775
100 à — 15	56	1,4
100 à — 22	80,4	2
100 à — 30	92	2,3
100 à — 50	102	2,5
100 à — 75	109	2,7
100 à — 100	113,6	2,84

Tableau I.

I (mA)	H (A/m)	B (T)
100	50	1,42
18	9	1,42 — 0,1 = 1,32
0	0	1,42 — 0,3 = 1,12
— 10	— 5	1,42 — 0,775 = 0,645
— 15	— 7,5	1,42 — 1,40 = 0,02
— 22	— 11	1,42 — 2,01 = — 0,58
— 30	— 15	1,42 — 2,3 = — 0,88
— 50	— 25	1,42 — 2,5 = — 1,08
— 75	— 37,5	1,47 — 2,7 = — 1,28
— 100	— 50	1,42 — 2,84 = — 1,42

Tableau II.

REMARQUE 1.

Pour le même tore en matériau « Imphysil », nous donnons (fig. 12) le cycle obtenu directement avec un montage oscillographique dans les mêmes conditions de saturation . c'est un *cycle dynamique* à 50 périodes par seconde ; il diffère quelque peu du *cycle statique* précédent obtenu en courant continu.

REMARQUE 2.

La figure 13 donne des exemples de cycles d'hystérésis pour du fer doux et de la fonte.

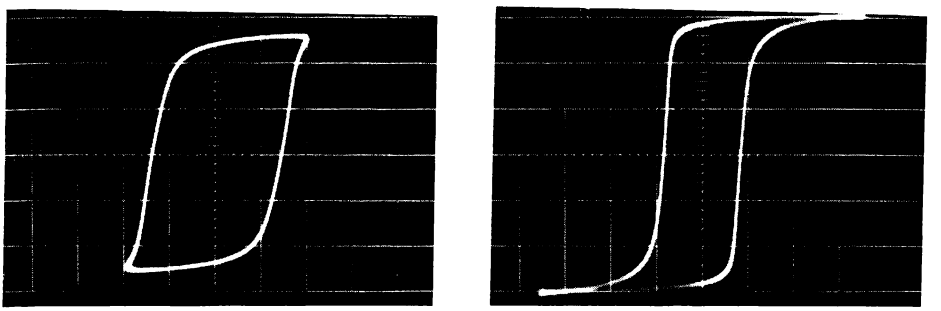


FIG. 12. — Cycle d'hystérésis du même tore relevé par procédé oscillographique.

La déviation horizontale est proportionnelle au courant d'excitation ; la déviation verticale est proportionnelle à l'induction.

a) La saturation n'est pas atteinte.

b) $I_{max} = 0{,}42$ A ; la saturation est dépassée ; il a fallu réduire la déviation horizontale.

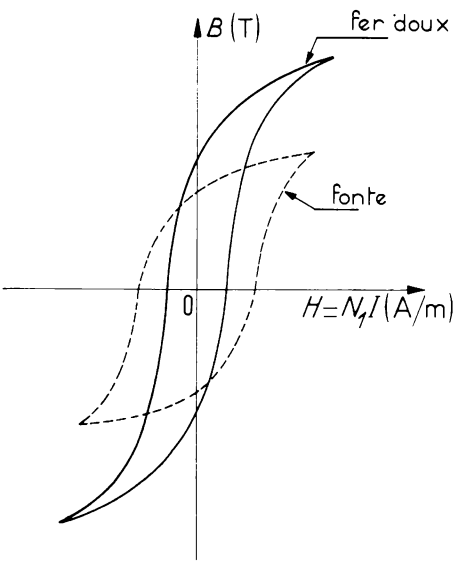


FIG. 13. — Allure des cycles d'hystérésis du fer et de la fonte.

D. — Applications et inconvénients de l'hystérésis

Les applications sont dues à l'induction rémanente, les inconvénients aux cycles d'hystérésis répétés.

a) *Les applications de l'induction rémanente sont importantes :*

— *Aimants artificiels.*

— *Amorçage des génératrices électriques ;* grâce à l'induction rémanente, les génératrices électriques s'amorcent seules (sans générateur auxiliaire).

— *Réalisations de mémoires magnétiques ;* c'est surtout en électronique que l'utilisation du phénomène a permis de stocker un très grand nombre d'informations, facilement accessibles, dans un petit volume.

b) *L'inconvénient de l'hystérésis est de produire un dégagement de chaleur, donc une perte d'énergie.*

Dans les machines électriques, différentes pièces de fer ou d'acier se trouvent en permanence dans des champs d'induction magnétique variables ; et ainsi, soumises à des cycles répétés d'hystérésis, s'échauffent et diminuent le rendement. Aussi la connaissance des propriétés magnétiques des matériaux à utiliser est-elle indispensable pour le constructeur de matériel électrique.

On démontre que la puissance perdue est proportionnelle à l'aire du cycle d'hystérésis, au volume du matériau et au nombre de cycles par seconde : on l'exprime en watt par kilogramme (W/kg).

PROBLÈMES DE LA LEÇON III

1. Les mesures d'un échantillon de tôle au silicium ont donné pour l'induction B en fonction du champ magnétique $H = N_1 I = \frac{NI}{l}$, les résultats suivants pour la courbe de première aimantation :

$N_1 I$ (A/m)	200	500	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
B(T)	1	1,27	1,37	1,47	1,54	1,58	1,62	1,65
$N_1 I$ (A/m)	8 000	10 000	13 000	15 000	20 000	25 000	30 000	34 000
B(T)	1,71	1,75	1,8	1,83	1,89	1,93	1,97	2

1° Calculer l'induction B_0 que le champ H produirait dans l'air.

2° En déduire la perméabilité relative μ_r correspondant à chaque valeur de B_0 et tracer la courbe $\mu_r = f(B_0)$.

3° Tracer la courbe d'aimantation $B = f(B_0)$.

Réponses pour $N_1 I = 1\,000$: 1° $B_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-3}$ T ; 2° $\mu_r = 1\,090$.

2. Dans le but de tracer la courbe de première aimantation d'un tore en acier massif de section droite $s = 4$ centimètres carrés, on a relevé expérimentalement les déviations d d'un fluxmètre pour divers courants d'excitation I.
Pour obtenir une courbe précise, on a utilisé d'abord une bobine exploratrice ayant $n = 10$ spires, puis une bobine exploratrice ayant $n = 50$ spires. On a trouvé :

— Pour $n = 10$ spires et $I \geqslant 100$ mA :

I(A)	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
d (divisions)	52	49	44	40	36	30	25	20	11,5	4

— Pour $n = 50$ spires et $I \leqslant 100$ mA :

I(mA)	100	90	70	60	50	40	30	20	15
d (divisions)	20	16,3	10,5	8	6	4	2,5	1,2	1

On demande de tracer la courbe $B = f(H)$, sachant qu'une division du fluxmètre vaut $2 \cdot 10^{-4}$ weber. Le tore comporte $N = 500$ spires et sa longueur moyenne est $l = 0,5$ mètre.

Réponses pour $I = 0,5$ A : $H = 500$ A/m ; $B = 2$ T.

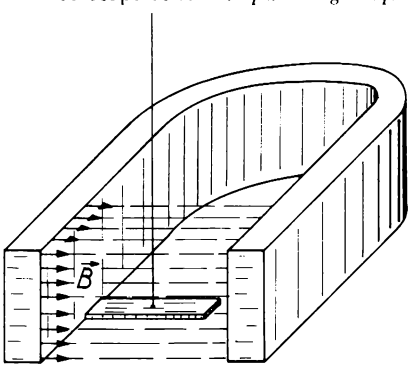
LECTURES TECHNIQUES

I. — Classification magnétique des corps

Le cobalt, le nickel, leurs alliages entre eux ou avec le fer possèdent, **comme le fer,** la propriété de s'aimanter très fortement.

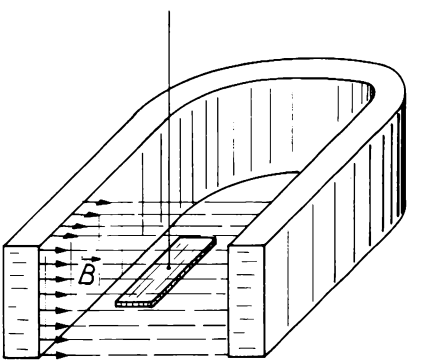
Le fer étant le plus anciennement connu, tous les corps capables de s'aimanter *fortement* sont dits *ferromagnétiques*. Tous les autres corps réagissent plus ou moins *faiblement* en présence d'un champ magnétique mais, à l'inverse des ferromagnétiques, leur aimantation disparaît avec le champ excitateur. Ainsi :

— Certains corps tels que l'aluminium, le platine, le potassium sont *attirés* faiblement par un aimant puissant. Une petite barre rectangulaire de l'un de ces éléments étant suspendue entre les pôles d'un gros aimant permanent en U (fig. 1) tourne jusqu'à ce que son axe longitudinal soit *parallèle* aux lignes du champ magnétique de l'aimant : ces corps sont dits *paramagnétiques*.



Lectures. Fig. 1.

Un corps paramagnétique tend à occuper les régions où le champ est le plus intense.



Lectures. Fig. 2.

Un corps diamagnétique, au contraire, fuit les régions de champ intense.

— D'autres corps tels que l'or, le cuivre, le bismuth sont *repoussés* faiblement par un aimant. Suspendue dans le champ magnétique d'un aimant comme dans l'expérience précédente, une barre rectangulaire de l'un d'eux effectue un mouvement de rotation pour disposer son axe longitudinal *perpendiculairement* aux lignes du champ magnétique de l'aimant (fig. 2) ; ces corps sont appelés *diamagnétiques*.

Il existe également des liquides et des solutions paramagnétiques ou diamagnétiques.

Si on dispose une branche d'un tube en U, rempli d'un tel liquide, entre les pôles d'un électro-aimant puissant, de façon que la surface du liquide soit dans le champ, on observe que le liquide :

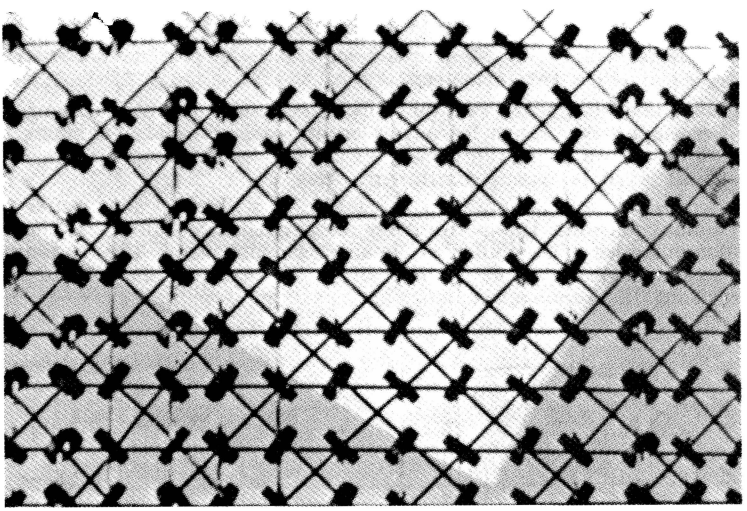
— s'élève dans le cas d'une substance paramagnétique, attirée par le champ (*exemple :* solution de chlorure ferrique) ;

— s'abaisse pour une substance diamagnétique, repoussée hors du champ (*exemple*. eau).

Nous devons à Faraday la première étude de ces corps.

2. — Les mémoires magnétiques (fig. 3)

Une mémoire magnétique est composée de milliers de tores dont les diamètres s'échelonnent du dixième de millimètre au centimètre ; ils sont en ferrite, qui est un corps ferromagnétique dérivé de l'oxyde de fer Fe_2O_3 et caractérisé par une grande perméabilité magnétique, en même temps que par une résistance électrique élevée.



Lectures. Fig. 3. — **Mémoire centrale à tores de ferrite.**

(Document C. E. M.)

Les mémoires magnétiques constituent l'un des éléments de base de toute machine électronique à calculer, appelée *ordinateur :* elles servent de *support d'informations*, capable d'enregistrer les ordres successifs d'un programme, de grouper toutes les données utiles à sa réalisation et de stocker les résultats en vue de leur utilisation immédiate ou différée.

IV. — CIRCUITS MAGNÉTIQUES

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— aimant en fer à cheval et armatures de différentes formes et natures;
— tore circulaire avec et sans entrefer ;
— inducteurs et induits de machines tournantes ;
— circuit magnétique de transformateur ;
— différents électro-aimants ;
— source de courant continu ;
— rhéostat.

A. — But des circuits magnétiques

1 — Définition.

Nous avons vu que les lignes d'induction sont des courbes fermées ; dans les machines électriques, on prévoit pour leur passage un trajet de *grande perméabilité* par l'utilisation de noyaux en fer doux, en tôles d'acier, de carcasses en acier coulé..., canalisant le flux magnétique dont les lignes d'induction sont fermées : on réalise ainsi un **circuit magnétique**. Grâce au circuit magnétique, les lignes d'induction se dispersent peu et le flux est amené — avec le minimum de pertes — dans la région où il est utilisé.

Un aimant en fer à cheval avec son armature, un assemblage de tôles réunies par des traverses (fig. 1 *a* et *b*) constituent des exemples de circuits magnétiques.

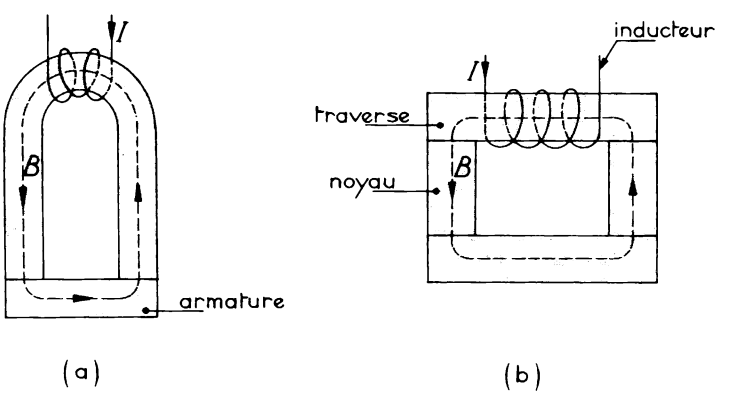


FIG. 1. — Circuits magnétiques avec enroulement inducteur d'excitation. Ce sont les seuls que nous considérerons par la suite.

Lorsque le matériau d'un circuit magnétique présente une interruption — appelée **entrefer** — les lignes d'induction passent d'une face à l'autre du circuit à travers l'air ; il y a nécessité d'un entrefer si le circuit magnétique possède une partie fixe et une partie mobile (relais, machines tournantes...) (fig. 2).

Le circuit magnétique le plus simple est le **tore** — précédemment utilisé (III § B) — parce qu'il est constitué d'un matériau unique, de section constante et sans entrefer (fig. 3) : ce circuit simple se retrouve sensiblement dans des machines appelées *transformateurs*.

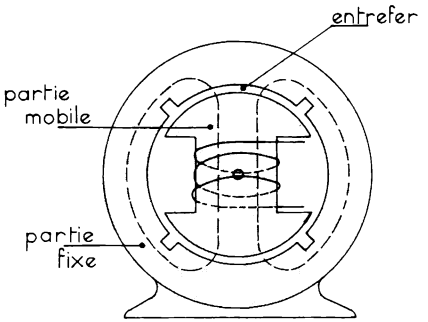


FIG. 2. — Circuit magnétique d'une machine tournante.

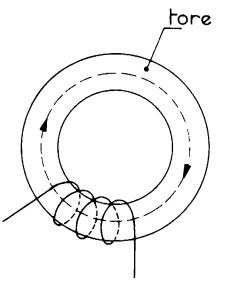


FIG. 3. — Tore : utilisé particulièrement dans les mesures.

En résumé :

On appelle circuit magnétique *l'ensemble des milieux constituant un circuit fermé et pouvant être le siège d'un flux d'induction magnétique* (Vocabulaire électrotechnique).

2 — Le flux magnétique dépend de la nature, de la section, de la longueur du circuit magnétique.

Nous avons vu (II § B, 5) que le flux magnétique a son origine dans les ampères par mètre produits par l'enroulement parcouru par un courant I.

Considérons un circuit magnétique en fer, dont l'armature A est amovible, et traversé par un flux Φ produit par un nombre constant $N_1 I$ d'ampères par mètre (fig. 4 *a*).

a) Mesurons le flux à travers des armatures de mêmes dimensions que A, mais de natures différentes, en fonte (Φ'), puis en cuivre (Φ'') :

Le fluxmètre indique des valeurs différentes telles que $\Phi > \Phi' > \Phi''$; ceci traduit l'*influence de la nature* du circuit magnétique.

b) Mesurons maintenant le flux à travers des armatures toutes de même nature, en fer par exemple, mais de sections différentes e_2, e_3 (fig. 4 *b*) :

Le fluxmètre indique des valeurs différentes telles que $\Phi_2 > \Phi > \Phi_3$; en outre, pour une épaisseur e_1 mais une longueur $l' > l$, le flux Φ_4 est inférieur à Φ : ceci traduit l'influence des dimensions du circuit magnétique.

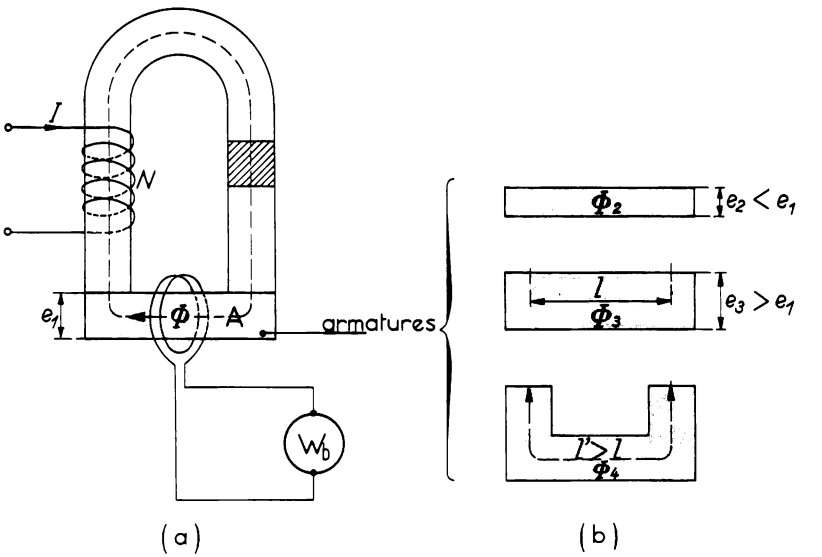


FIG. 4. — Le flux dépend de la nature et des dimensions du circuit magnétique.

B. — Analogies entre circuit magnétique et circuit électrique

La valeur du flux dépend du circuit magnétique, de même que l'intensité d'un courant dépend du circuit électrique qu'il parcourt.

I. — LOI D'HOPKINSON POUR UN MATÉRIAU HOMOGÈNE ET DE SECTION UNIFORME

Rappelons que :

— dans l'air, ou dans un matériau non ferromagnétique (bois, carton...), pour une bobine longue ou un tore, on a le flux :

$$\Phi_0 = B_0 S = \mu_0 \frac{NI}{l} S \quad \text{avec} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7};$$

— dans un matériau de perméabilité relative par rapport à l'air μ_r, ce flux devient :

$$\Phi = \mu_r B_0 S \gg \Phi_0$$

soit

$$\Phi = \mu_r \mu_0 \frac{NI}{l} S \qquad (1)$$

Séparons les grandeurs qui caractérisent le *circuit électrique* d'excitation et les grandeurs relatives au *circuit magnétique* ; l'expression (1) peut en effet s'écrire :

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu_r \mu_0 S}} \qquad (2)$$

Posons $NI = F$ et $\frac{l}{\mu_r \mu_0 S} = R_m$, l'expression (2) devient la formule d'Hopkinson :

$$\boxed{\Phi = \frac{F}{R_m}} \quad \begin{cases} \Phi \text{ en weber (Wb)} \\ F \text{ en ampère (A)} \\ R_m \text{ en ampère par weber (A/Wb)} \end{cases}$$

Cette relation est semblable à la loi d'Ohm pour un circuit électrique :

$$I = \frac{E}{R}$$

dans laquelle E est la f. é. m., R la résistance totale et I le courant.

C'est pourquoi, par analogie :

F est appelée **force magnétomotrice** (en abrégé : f. m. m.) et R_m la **réluctance** du circuit magnétique. Le flux est le quotient de la force magnétomotrice par la réluctance du circuit magnétique.

2. — RÉLUCTANCE

a) L'expression $$R_m = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S}$$

montre que la réluctance est :

— proportionnelle à la longueur l du circuit magnétique ;

— inversement proportionnelle à la section S et à la perméabilité relative μ_r du matériau.

Il y a similitude de forme avec l'expression d'une résistance :

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma S} \quad ; \quad \sigma = \frac{1}{\rho} \text{ est la conductivité.}$$

On voit qu'à la conductivité σ du circuit électrique correspond la perméabilité absolue $\mu = \mu_r \mu_0$ du circuit magnétique.

b) Exemple numérique. — Pour un noyau fer-silicium de caractéristiques $l = 1$ m ; $S = 20$ cm² ; $\mu_r = 10^4$, on trouve :

$$R_m = \frac{1}{10^4 . 4\pi . 10^{-7} . 20 . 10^{-4}} = \frac{1}{8\pi . 10^{-6}} \approx \frac{10^6}{25} = 4 . 10^4 \text{ A/Wb.}$$

3. — GROUPEMENT DES RÉLUCTANCES

De même que les circuits électriques, les circuits magnétiques comportent en général divers éléments de natures et de dimensions différentes.

De la conservation du flux Φ à travers le circuit magnétique, comme du courant I tout le long d'un circuit, on déduit que :

— la réluctance équivalente R à des réluctances en série (fig. 5) est la somme de ces réluctances :

$$R_m = R_{m1} + R_{m2} + \ldots$$

— l'inverse de la réluctance équivalente R à des réluctances en dérivation est égale à la somme des inverses de ces réluctances (fig. 6) :

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{R_{m2}} + \ldots$$

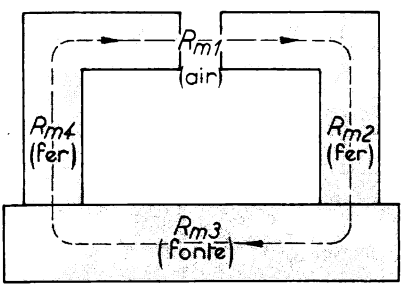


FIG. 5. — Exemple de réluctances en série : $R = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{m4}$.

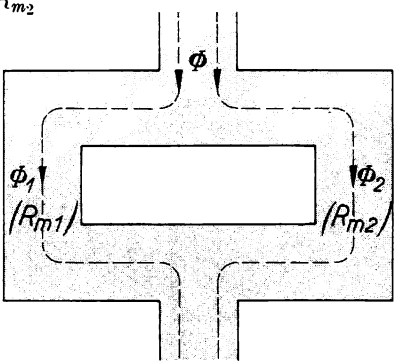


FIG. 6. — Réluctances en parallèle.

4. — TABLEAU COMPARATIF

CIRCUIT ÉLECTRIQUE	CIRCUIT MAGNÉTIQUE
F. é. m. : E	F. m. m. : $F = NI$
Résistance : R	Réluctance : R_m
avec $R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma S}$	avec $R_m = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S}$
Loi d'Ohm : $E = RI$	Loi d'Hopkinson : $F = R_m \Phi$
Résistances en série : $R = R_1 + R_2 + \ldots$	Réluctances en série : $R_m = R_{m1} + R_{m2} + \ldots$
Résistances en parallèle : $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots$	Réluctances en parallèle : $\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{R_{m2}} + \ldots$

C. — Différences entre circuit magnétique et circuit électrique

1. Une coupure dans un circuit électrique interrompt le courant ; une coupure dans un circuit magnétique augmente la réluctance — donc diminue le flux pour une même force magnétomotrice— mais ne le supprime pas.
2. Le courant électrique reste dans le conducteur qui le transporte ; dans un circuit magnétique, il existe toujours une partie du flux magnétique qui se ferme par l'air et constitue les fuites magnétiques du circuit (dispersion magnétique) (fig. 7).

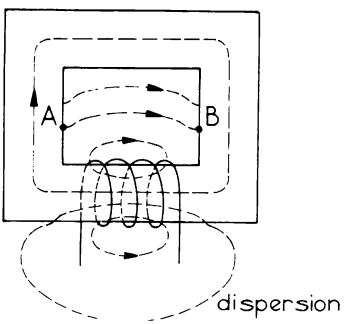


FIG. 7. — Entre deux points A et B, les lignes d'induction se ferment principalement par le circuit magnétique, mais il existe aussi des lignes d'induction dans l'air (dispersion magnétique).

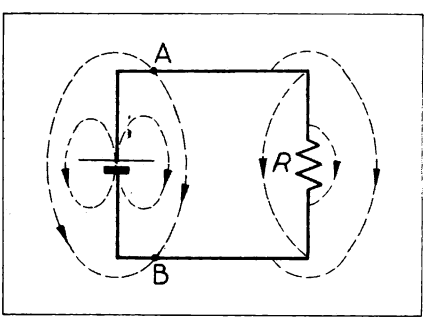


FIG. 8. — Entre deux points de potentiels différents, tels que A et B, les lignes de courants se ferment non seulement par la charge R, mais en traversant le liquide conducteur (dispersion électrique).

On peut, à ce titre, comparer un circuit magnétique à un circuit électrique plongé dans un liquide faiblement conducteur (de l'eau légèrement acidulée par exemple) (fig. 8).

3. La réluctance dépend de la perméabilité dont la valeur varie avec l'induction et le flux ; la résistance pour un circuit électrique est indépendante du courant, à l'exception des cas d'échauffements qui peuvent modifier la résistivité.

D. — Les électro-aimants

1 — Une bobine et son noyau constituent un électro-aimant (1).

D'une manière générale, un circuit magnétique ouvert, avec son enroulement *inducteur* constituent un électro-aimant : le circuit magnétique se ferme en attirant une *armature* ferromagnétique.

2 — Principales formes d'électro-aimants.

Suivant leurs applications, les électro-aimants sont :

— à noyau fixe droit (fig. 9 *a*) ;
— à noyau fixe en fer à cheval (fig. 9 *b*) ou rectangulaire ;
— à noyau plongeur (fig. 9 *c*) ;
— à noyau plongeur type cuirassé (fig. 9 *d*).

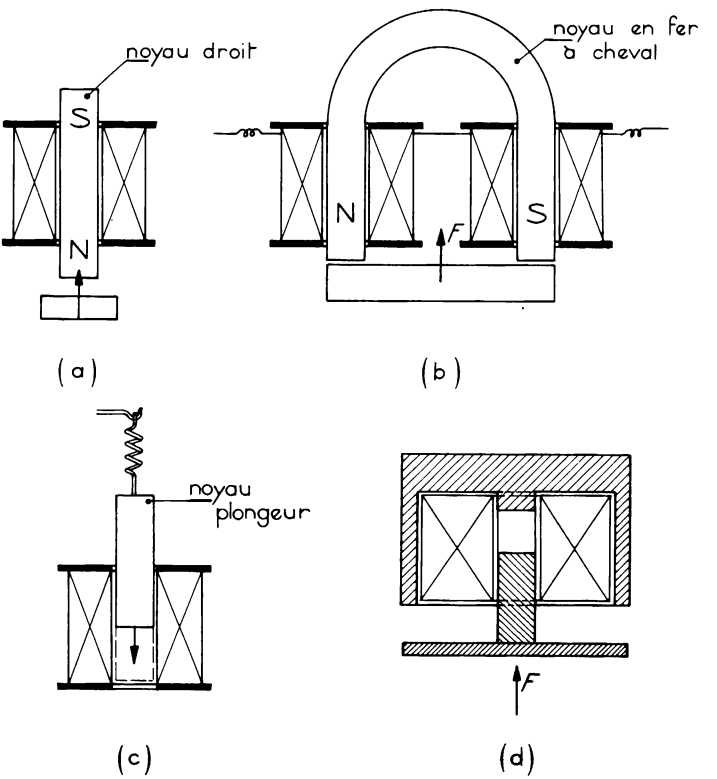


Fig. 9.

(1) Les dictionnaires donnent ce terme en deux mots ; le Vocabulaire Électrotechnique (U. T. E.) l'écrit en un seul, mais la normalisation n'est impérative que pour les définitions et les symboles. De même pour le terme *auto-induction*.

3 — Force portante.

Quand un courant alimente l'enroulement inducteur, l'armature est attirée contre les pôles et maintenue avec une **force portante** F (fig. 10) qui peut être considérable et dont la valeur est donnée par la relation (1) :

$$F = 10^7 \frac{B^2 S}{8\pi}$$

F en newton
B en tesla
S en mètre carré

dans laquelle S est la surface totale de contact entre le noyau et l'armature, B l'induction dans le noyau.

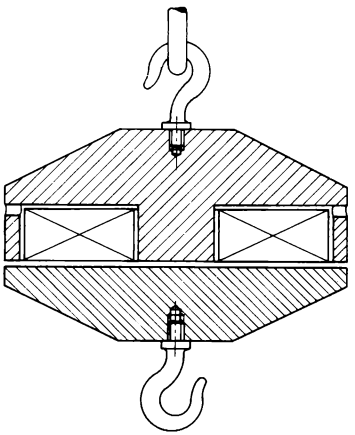


Fig. 10. — Électro-aimant porteur, de forte puissance, de type cuirassé.

4 — Applications.

Les applications des électro-aimants sont multiples.

De nombreux appareils électriques utilisent les électro-aimants pour mouvoir un de leurs organes ; c'est le cas :

— des sonneries électriques ;
— des relais et contacteurs disjoncteurs ;
— des appareils de levage (fig. 10) ;
— du télégraphe Morse ;
— des machines électriques.

Les électro-aimants servent enfin à créer des inductions magnétiques très intenses dans les laboratoires de recherche scientifique (cyclotrons...).

---

(1) Cette relation s'écrit encore $F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ étant la perméabilité du vide et pratiquement de l'air (II, § A 3).

E. — Exercice résolu

Un électro-aimant en fer à cheval et son armature ont une longueur moyenne de 1 mètre avec une section, considérée comme uniforme, de 10 centimètres carrés ; on veut que la force portante soit de 1 000 newtons.

a) *Quelle est l'induction ?*

b) *Quelle doit être la force magnétomotrice* $F = NI$, *en admettant, pour l'induction calculée, une perméabilité relative* $\mu_r = 1\,600$ *?*

c) *Si le courant est* $I = 2$ *A, quel est le nombre de spires de l'enroulement inducteur ?*

Solution.

a) L'expression de la force portante de l'électro-aimant est :

$$F = 10^7 \frac{B^2 S}{8\pi}.$$

On doit donc avoir :

$$B^2 = \frac{8\pi F}{10^7 S},$$

S représentant la section totale des surfaces de contact, soit $2 \cdot 10^{-3}$ m^2.

On en déduit l'induction :

$$B^2 = \frac{8\pi \cdot 10^3}{10^7 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = \frac{4\pi}{10}$$

$$B = \sqrt{\frac{4\pi}{10}} = 1{,}12 \text{ T}.$$

b) A cette induction correspond la perméabilité $\mu_r = 1\,600$.

La loi du circuit magnétique nous permet d'écrire :

$$NI = R\Phi$$

$$NI = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} BS = \frac{Bl}{\mu_0 \mu_r}$$

soit en remplaçant les symboles par leur valeur :

$$NI = \frac{1{,}12 \cdot 1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1{,}6 \cdot 10^3} \approx 560 \text{ A}.$$

c) Nombre de spires :

$$N = \frac{560}{2} = 280 \text{ spires}.$$

PROBLÈMES DE LA LEÇON IV

1. Un tore de longueur moyenne $l = 0{,}50$ mètre a un enroulement d'excitation parcouru par un courant $I = 2$ ampères.

L'induction à l'intérieur du tore est $B = 1{,}5$ tesla et la perméabilité magnétique relative correspondante $\mu_r = 1\,500$.

Calculer le nombre de spires N de l'enroulement.

Réponse : $N \approx 200$.

2. On donne le tableau de mesures suivant, correspondant à un fer doux de qualité ordinaire ($B_0 = \mu_0 H = \mu_0 N_1 I$) :

$10^4\ B_0$ (T)	0,5	1	1,5	1,75	2	2,5	3	4	5	6	10
B (T)	0,04	0,14	0,3	0,41	0,50	0,64	0,72	0,88	0,95	1,02	1,2
μ_r	800	1 400	2 000	2 340	2 500	2 560	2 400	2 200	1 900	1 700	1 200

On veut réaliser un électro-aimant en fer à cheval de longueur moyenne, armature comprise, $l = 0{,}80$ mètre et de section $S = 20$ centimètres carrés, capable d'une force portante $F = 100$ newtons. L'enroulement d'excitation comportant $N = 50$ spires, quelle est l'intensité I du courant nécessaire ?

Réponse : $I \approx 1{,}8$ A.

3. Un électro-aimant rectiligne en fer doux a une section droite $S = 80$ centimètres carrés et un nombre d'ampères par mètre $H = N_1 I = 120$.

Calculer la valeur de la force portante F de cet électro-aimant ; la perméabilité relative μ_r sera déduite du tableau relatif au problème précédent.

Réponse : $F \approx 290$ N.

4. On dispose d'un tore en alliage fer-silicium de diamètre moyen 160 millimètres, de section 4 centimètres carrés, coupé par un entrefer d'épaisseur $e = 2$ millimètres.

Calculer pour un flux $\Phi = 0{,}4$ milliweber dans ce circuit magnétique :

1° La reluctance R_1 du fer.

Nota : On déduira la perméabilité μ_r du tableau relatif au problème 1, leçon III.

2° La reluctance R_2 de l'entrefer.

3° Le nombre de spires N de l'enroulement si le courant est $I = 1$ ampère.

Réponses : 1° $R_1 \approx 0{,}25 \cdot 10^6$ A/Wb ; $\mu_r = 4 \cdot 10^3$. 2° $R_2 \approx 4 \cdot 10^6$ A/Wb. 3° $N \approx 1\,700$.

5. Un circuit magnétique, de section constante $s = 5 \cdot 10^{-4}$ mètres carrés, est constitué d'un assemblage de tôles au silicium dont le coefficient de foisonnement est 0,8 ; ses dimensions sont données par la figure ci-contre. Sachant que dans le noyau central, l'induction est $B = 2$ teslas lorsque son enroulement est traversé par un courant $I = 1$ ampère, calculer :

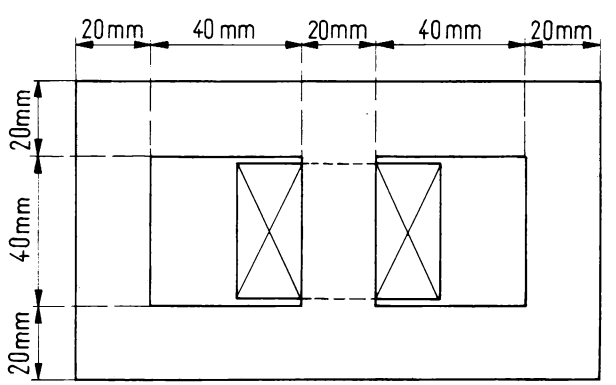


FIG. Pb 5.

1° La réluctance totale du circuit.

2° Le nombre de spires de l'enroulement central.

On se reportera au tableau du problème 1, leçon III, pour déduire la perméabilité.

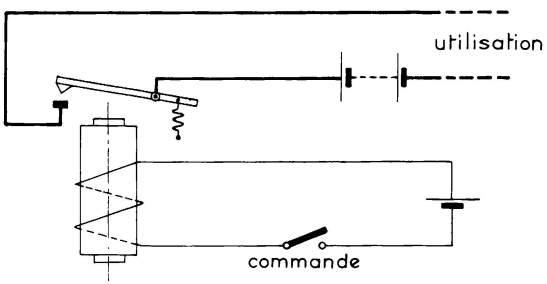
Réponses : 1° $R_t = 2{,}6 \cdot 10^6$ A/Wb. 2° $N \approx 2\,080$.

LECTURE TECHNIQUE

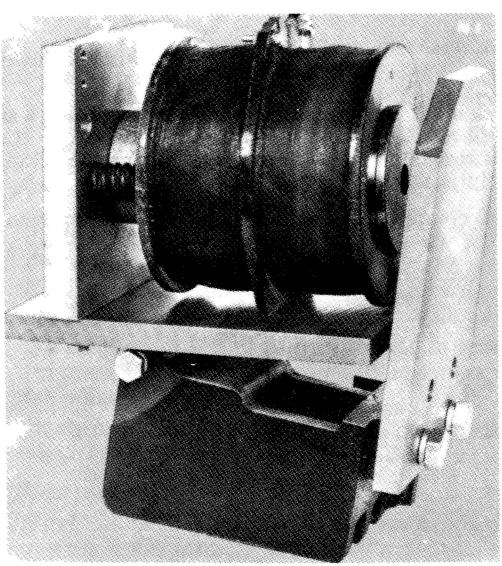
Applications des relais électromagnétiques

1° Principe du relais électromagnétique.

C'est un électro-aimant très sensible qui permet de commander à distance la fermeture et l'ouverture d'un circuit pouvant comporter des appareils puissants. Le *circuit de commande* du relais est traversé par un courant de *faible intensité* : l'armature du relais est attirée et ferme de ce fait un *circuit d'utilisation* — encore appelé *circuit de puissance* — parcouru par un courant *de grande intensité* (fig. 1 et 2).



Lecture. FIG. 1.



Lecture. FIG. 2. — **Électro-aimant de commande, alimentation en courant continu.**

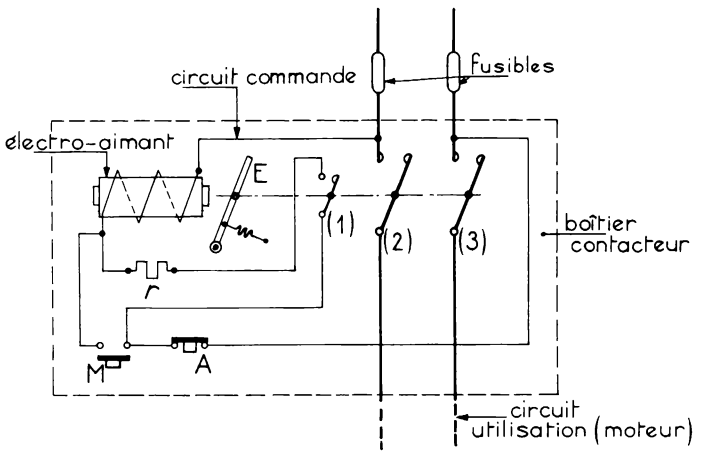
(Document C. E. M.)

2. Applications.

Les sonneries électriques, les gâches électriques de porte, les électro-aimants des grues de levage sont parmi les applications les plus usuelles des relais.

Nous donnons à la suite un exemple d'application à la commande d'un moteur électrique au moyen d'un *contacteur.*
Un contacteur est un relais qui ferme un interrupteur, puis ouvre celui-ci dès que le courant cesse (fig. 3) :

Le bouton poussoir A étant enclenché, lorsque l'on donne une impulsion par l'intermédiaire du bouton poussoir M (marche), le circuit de commande de l'électro-aimant est alimenté, la palette E est attirée, entraînant dans son mouvement la fermeture du contact (1) et des contacts (2) et (3) du circuit d'utilisation.



Lecture. Fig. 3.

L'électro-aimant reste alimenté, après cessation du contact M rappelé par son ressort à sa position initiale, le circuit de commande se refermant maintenant à travers *r* et (1). Ce contact (1) est dit contact de *maintien* et la résistance *r* dite résistance d'*économie* limitant le courant dans le relais à sa plus faible intensité.

L'ouverture du circuit d'utilisation et l'arrêt complet du moteur sont exécutés en appuyant sur le bouton A (bouton d'arrêt).

V. — ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— source de 24 volts avec rhéostat de 62 ohms
— gros aimant en fer à cheval ;
— conducteur rectiligne en cuivre suspendu à un support ;
— godet de mercure ;
— support avec rubans métalliques parallèles ;
— électro-aimant (bras de 850 mm, largeur 25 mm, épaisseur 22 mm) ; 52 spires de 10/10
— 2 rails conducteurs horizontaux distants de 250 mm ;
— tige rectiligne en aluminium de 300 mm ;
— galvanomètre ;
— wattmètre ;
— ampèremètre.

A. — Forces électromagnétiques

Rappelons que l'électromagnétisme *traite des actions réciproques entre les courants et les aimants, et* l'électrodynamique *des actions entre courants. Il n'existe aucune différence de nature physique entre le champ magnétique des aimants et celui des courants : les forces exercées par un champ sur un courant sont indépendantes de l'origine du champ.*

Cette origine n'a d'importance que dans les applications pour désigner les différents types d'appareils.

I. — EXPÉRIENCE

Rappelons que l'induction est uniforme lorsque les lignes d'induction qui la composent sont parallèles entre elles ; l'induction $\vec{B}$ a alors la même valeur dans tout le champ.

Dans l'entrefer d'un aimant en fer à cheval, on dispose un conducteur rectiligne vertical (fig. 1 *a*) dont une extrémité est reliée à un support O, l'autre étant plongée dans un godet de mercure ; un courant peut le traverser du bas vers le haut lorsque l'interrupteur est fermé. L'expérience montre que, à l'instant de l'établissement du courant, le conducteur est déplacé de sa position d'équilibre pour prendre une autre position faisant un certain angle avec la verticale.

Recommençons après avoir inversé le sens du courant, le sens du déplacement est lui aussi inversé ; il en est de même pour un sens donné du courant, si l'on inverse les pôles de l'aimant.

Beaucoup d'autres dispositifs expérimentaux montrent l'existence des forces électromagnétiques (fig. 5, p. 66; fig. 1, p. 74...).

CONCLUSION.

Tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à des forces.

Les forces exercées par les champs magnétiques sur les courants sont appelées *forces électromagnétiques*.

REMARQUES.

— Le mercure permet le déplacement du conducteur mobile dans une direction quelconque. Or, le conducteur se déplace perpendiculairement à la direction du champ : la force électromagnétique est donc perpendiculaire au vecteur induction $\vec{B}$.

— Nous considèrerons en général les forces électromagnétiques dans des champs uniformes, les calculs étant plus simples que pour les champs non uniformes.

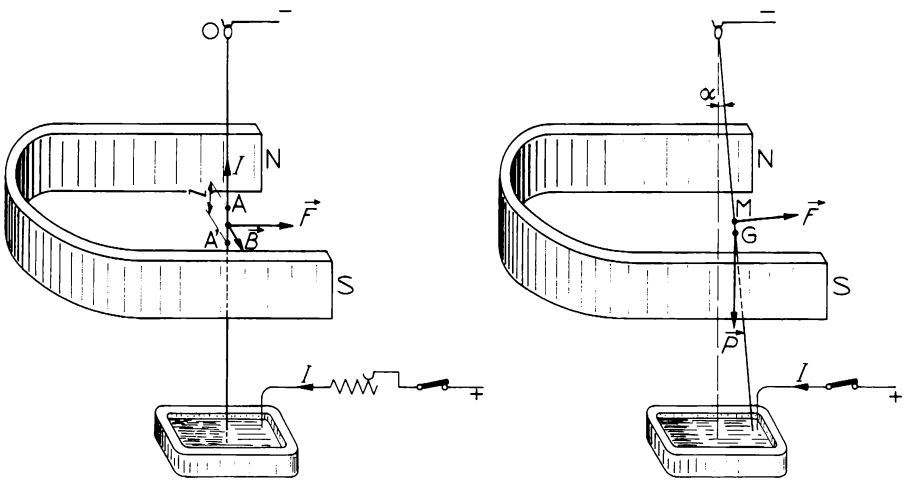


FIG. 1.

a) A l'instant de l'établissement du courant I, la force électromagnétique F apparaît et entraîne le conducteur dans la position de la figure (*b*).

b) L'équibre se réalise lorsque le moment de la force F est égal au moment de la force P.

2. — LOI DE LAPLACE (1)

Dans le cas simple d'un champ magnétique uniforme, elle a pour énoncé (2) :

La force $\vec{F}$ exercée par un champ magnétique uniforme sur un conducteur rectiligne de longueur l et parcouru par un courant I :

— *est perpendiculaire au plan défini par le conducteur l et le vecteur induction $\vec{B}$;*

— *est dirigée vers la gauche de l'observateur d'Ampère regardant dans le sens de l'induction :*

— *a pour expression dans le cas d'un conducteur perpendiculaire à la direction de l'induction :*

$$F = BIl$$

F *en newton.*
B *en tesla.*
I *en ampère.*
l *en mètre.*

(1) LAPLACE (1749-1827). Mathématicien, astronome et physicien français célèbre par ses traités de mécanique céleste et ses travaux sur l'électromagnétisme.

(2) L'énoncé le plus général concerne un élément de courant Idl et un champ magnétique quelconque.

REMARQUES.

— On peut aussi trouver le sens de la force par la règle des 3 doigts de la main *droite*.

Le *pouce* disposé dans le sens de l'induction $\vec{B}$, le *majeur* dans le sens du courant I, l'*index* se place naturellement dans le sens de la force F (1).

— Si la direction de l'induction et la direction du conducteur font un angle quelconque α entre elles, l'expression de la force électromagnétique devient :

$$F = BIl \sin \alpha$$

— La force de Laplace est la même, que le conducteur soit immobile ou en mouvement.

3. — ACTION RÉCIPROQUE DE DEUX COURANTS PARALLÈLES

a) Expérience.

A l'aide d'un support, on constitue un circuit conducteur avec deux rubans métalliques (fig. 2) disposés parallèlement et à très faible distance l'un de l'autre ; un rhéostat permet d'y faire varier l'intensité du courant.

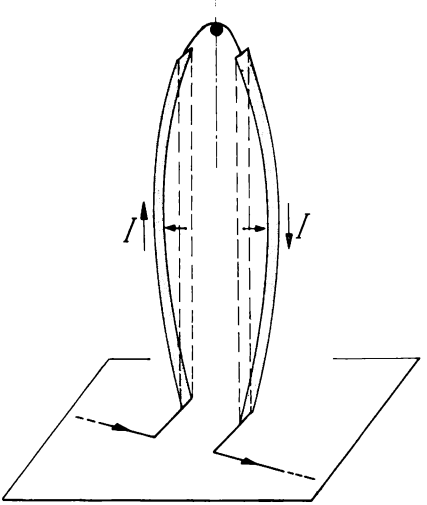


FIG. 2. — Courants de sens contraires : les deux rubans conducteurs, verticaux en l'absence de courant, se repoussent.

Il est facile d'observer que les conducteurs parallèles s'écartent et *se repoussent* lorsque les courants qui les traversent sont de *sens opposés*.

Si l'on modifie le dispositif de façon que les conducteurs parallèles soient parcourus par des courants de *même sens*, ces conducteurs *s'attirent* entre eux.

Il existe donc une **action réciproque** entre deux conducteurs parcourus par des courants.

(1) Courant, champ et force forment un *trièdre trirectangle* de même sens que les axes *ox*, *oy*, *oz* habituels de l'espace ; d'où l'autre règle (main droite) : courant (*pouce*), champ (*index*), force (*majeur*).

b) **Loi quantitative pour deux courants parallèles indéfinis.**

Soient L_1 et L_2 (fig. 3) deux conducteurs rectilignes et parallèles, de grande longueur par rapport à leur distance d et considérons un plan perpendiculaire à ces deux conducteurs.

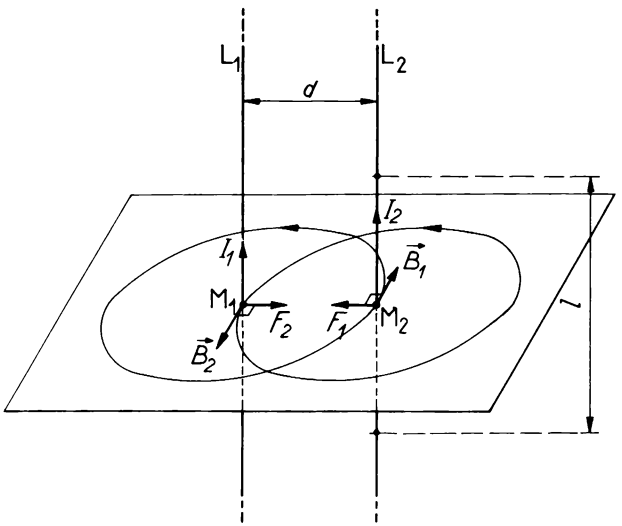


FIG. 3. — Action mutuelle de deux courants parallèles sur une portion l de chaque conducteur.

Le courant indéfini I_1 crée en un point de l'autre (M_2 par exemple sur la figure) une induction

$$B_1 = 10^{-7} \frac{2\,I_1}{d}.$$

Le courant I_2 crée de même en un point de l'autre, M_1 :

$$B_2 = 10^{-7} \frac{2\,I_2}{d}.$$

La loi de Laplace, appliquée à la longueur l du conducteur L_2, donne la force :

$$F_1 = B_1 I_2 l = 2 \,.\, 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{d} l.$$

Identiquement, sur une longueur l de L_1 :

$$F_2 = B_2 I_1 l = 2 \,.\, 10^{-7} \frac{I_1 I_2 l}{d} = F_1.$$

D'une manière générale, toute action, entre deux conducteurs de formes quelconques et de disposition quelconque, parcourus par un courant, est dite *électrodynamique.*
L'**électrodynamique** est la partie de la science qui traite des actions entre les courants électriques (*Vocabulaire électrotechnique*).

REMARQUE.

La force électrodynamique s'exerçant entre deux conducteurs, fils de lignes ou barres d'alimentation, est généralement faible, mais elle peut devenir importante et destructrice au moment de fortes surintensités dues à un court-circuit.

c) Définition légale de l'ampère.

Si l'on considère deux conducteurs parallèles indéfinis tels que (fig. 4) :

$$I_1 = I_2 = 1 \text{ A}$$
$$d = 1 \text{ m}$$
$$l = 1 \text{ m}$$

la force qui s'exerce entre eux par mètre de longueur est :

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{d} l = 2 \cdot 10^{-7} \text{ newton.}$$

On en a déduit la définition légale de l'ampère :

L'ampère est l'intensité d'un courant qui, passant dans deux conducteurs rectilignes, parallèles, de longueur théoriquement infinie, distants de 1 mètre, produit entre ces conducteurs une force $F = 2 \cdot 10^{-7}$ *newton par mètre de longueur.*

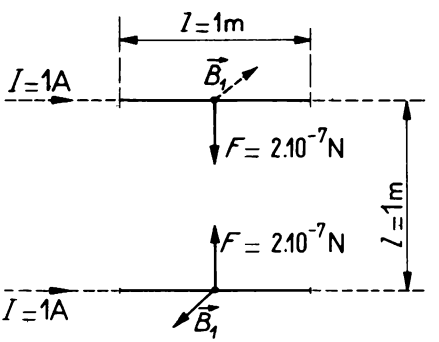


FIG. 4. — Définition légale de l'ampère.

B. — Travail des forces électromagnétiques

I. — LOI

Comme toute force, une force électromagnétique déplaçant son point d'application effectue *un travail.* Lorsque le déplacement et la force ont même direction, le travail est égal au produit de la *force* par *la longueur* du déplacement. Ainsi un conducteur $M_1N_1 = l$ (fig. 5) parcouru par un courant I, placé dans un champ d'induction B, est soumis à la force F qui le fait passer en M_2N_2 à la distance d de sa position initiale.

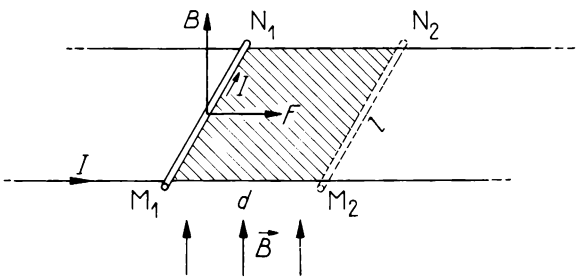


FIG. 5. — La force électromagnétique F déplace le conducteur : c'est un cas moteur ; la règle de la main *droite* donne le sens de F.

Il effectue un travail :

$$W = Fd = BIld.$$

Mais le produit ld représente l'aire S balayée au cours du déplacement du conducteur ; l'expression s'écrit :

$$W = BIS$$

soit $\boxed{W = I\,\Phi}$ $\begin{cases} W \text{ en joule} \\ I \text{ en ampère} \\ \Phi \text{ en weber} \end{cases}$

dans laquelle $\Phi = BS$ est le flux coupé par le conducteur passant de sa position initiale à sa position finale. Notons que le flux coupé est égal à l'accroissement $\Phi_2 - \Phi_1$ du flux embrassé par le circuit auquel appartient le conducteur.

Ceci montre que le travail effectué par des forces électromagnétiques au cours du déplacement d'un conducteur est proportionnel à l'intensité du courant qui le traverse et au flux d'induction *coupé* pendant le déplacement.

REMARQUE.

Nous noterons que cette relation est indépendante de la *forme* qui caractérise le circuit ; elle est donc applicable à un circuit quelconque.

2. — SENS DU DÉPLACEMENT D'UN CONDUCTEUR SOUS L'EFFET DES FORCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

a) Expérience.

Une bobine plate est suspendue par l'intermédiaire de deux longs fils conducteurs; lorsque le courant passe (fig. 6 *a*), approchons de la face Sud de la bobine le pôle Nord d'un aimant droit : la bobine est attirée et tend à s'embrocher sur l'aimant.

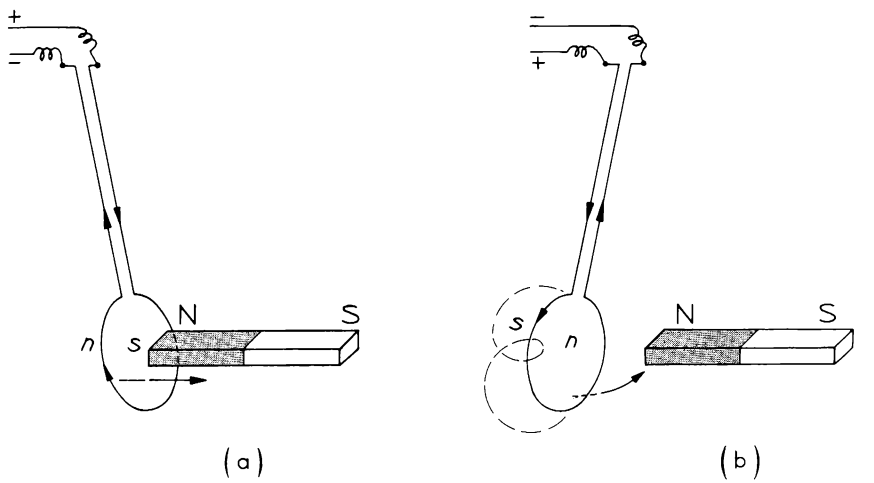


FIG. 6.

a) Attraction : la spire présente le maximum de surface au flux.

b) Répulsion, rotation de 180°, puis attraction : la spire présente le maximum de surface et une face telle que le flux soit maximal (revoir p. 31).

Inversons le sens du courant : les faces Nord et Sud de la bobine sont inversées; la bobine est repoussée par l'aimant puis se retourne et vient s'embrocher de nouveau sur l'aimant (fig. 6 *b*). Elle reçoit alors le flux maximal par sa face Sud.

b) Règle du flux maximal.

L'expérience précédente est relative à un circuit MOBILE ; le résultat est le même pour les circuits DÉFORMABLES ; toutes ces actions obéissent à la règle du flux maximal :

Un circuit parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tend à se déplacer ou à se déformer de façon à recevoir le flux maximal par sa face Sud.

C. — Action d'un champ magnétique sur un cadre :

Appareils de mesure

I. — PRINCIPE DU GALVANOMÈTRE A CADRE MOBILE ET A CHAMP RADIAL

Considérons un cadre, c'est-à-dire une bobine rectangulaire composée de N spires d'un fil fin isolé (fig. 7 *a*). Les extrémités de cet enroulement sont soudées à deux fils métalliques servant :

— de suspension du cadre et de connexions pour le passage du courant ;

— de fils de torsion tendant à ramener le cadre vers sa position d'équilibre en l'absence de courant.

a) Galvanomètre à champ radial : couple moteur.

Le cadre est mobile dans l'entrefer cylindrique limité par les pièces polaires d'un aimant en U et par un cylindre de fer doux qui augmente et dirige le champ. L'induction dans l'entrefer est :

— radiale, c'est-à-dire dirigée suivant les rayons communs aux deux surfaces cylindriques (fig. 7 *b*); il en résulte que l'induction a même valeur en tous les points de l'entrefer;

— perpendiculaire aux côtés verticaux des spires et dans le plan de celles-ci pour toute position du cadre.

La loi de Laplace nous permet d'exprimer les forces électromagnétiques pour une spire (fig. 7 *c*) :

— Les côtés horizontaux AB et CD sont parallèles au vecteur $\vec{B}$ et ne sont soumis à aucune force électromagnétique (expression de F, p. 63).

— Les côtés verticaux AC et BD d'une spire sont soumis à des forces F égales, parallèles, de sens contraire, normales au plan du cadre ; le couple moteur par spire est donc, en désignant par a la largeur du cadre :

$$Fa = BIla = BIS$$

en posant $la = S$, surface d'une spire; le couple électromagnétique résultant M pour N spires est :

$$\boxed{M = NSBI}$$

M en mètre-newton.
N nombre de spires.
S en mètre carré.
B en tesla.
I en ampère.

Il est *indépendant* de la position du cadre parce que le champ est *radial.*

b) Couple directeur ou antagoniste.

Le cadre tourne sous l'action du couple moteur, mais il en résulte une torsion des fils de suspension, donc un couple de torsion qui tend à s'opposer à la rotation.

Pour une déviation α du cadre et une constante de torsion C du fil, le moment du couple de rappel est :

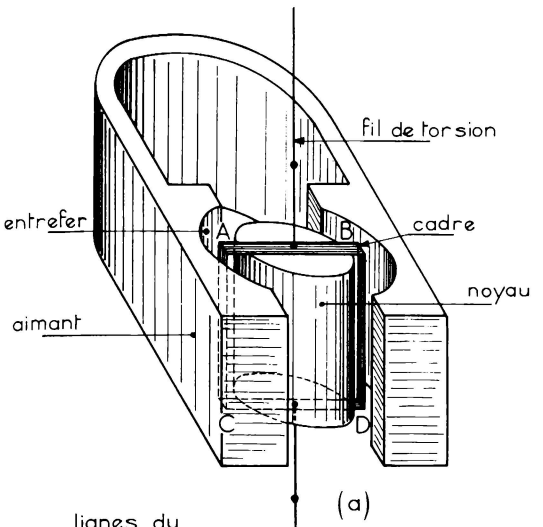
$$\boxed{M' = C\,\alpha}$$

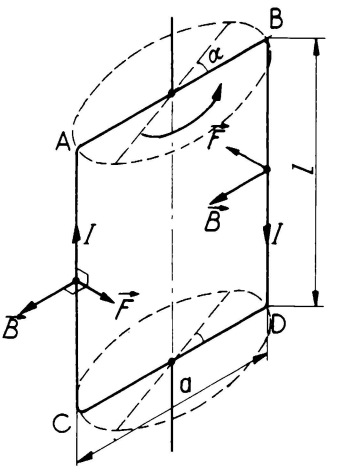
M' en mètre-newton.
α en radian.
C en mètre-newton par radian.

c) Équation du galvanomètre.

L'équilibre du cadre est établi lorsque le moment M du couple moteur est égal au moment M' du couple de torsion :

$$NSBI = C\,\alpha.$$





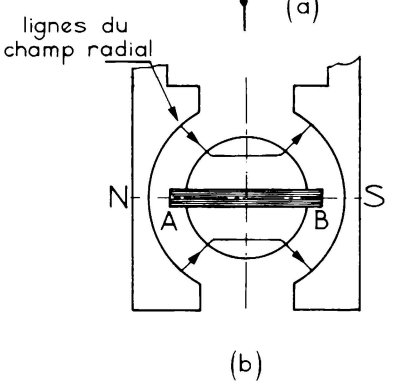
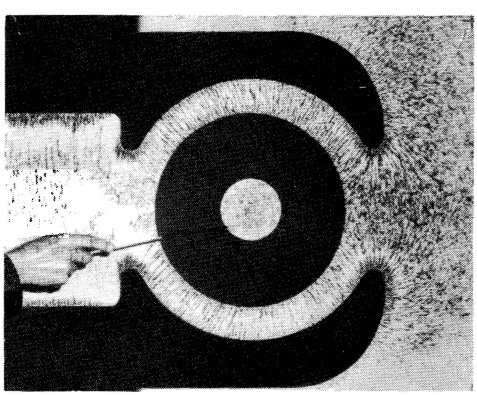


FIG. 7.

a) et *b*) Champ radial d'un galvanomètre à cadre mobile, pour la mesure des petits courants.

c) Grandeurs concernant chaque spire du cadre mobile.



Champ radial.
(Document Le Matériel d'Enseignement.)

On en déduit la déviation du cadre :

$$\boxed{\alpha = \frac{NSB}{C} I} \quad \text{(mêmes unités)}$$

Pour un appareil donné, l'expression $\frac{NSB}{C}$ est une constante de l'appareil :

La déviation du cadre est proportionnelle à l'intensité I du courant.

L'angle α est mesuré avec précision par la méthode optique de Poggendorff (1).

d) **Sensibilité d'un galvanomètre.**

Elle est d'autant plus grande que la déviation α est plus grande pour un courant I donné ; c'est pourquoi on la représente par le quotient $\frac{\alpha}{I}$:

$$\frac{\alpha}{I} = \frac{NSB}{C}.$$

La sensibilité augmente avec N,S et lorsqu'on diminue C; mais le poids du cadre augmente avec N et S, tandis qu'il faut prendre un fil de suspension plus fin, donc plus fragile pour augmenter C : le constructeur adopte un compromis entre ces deux conditions contradictoires. Les derniers progrès ont consisté à augmenter B grâce à de meilleurs aimants; on peut déceler des courants de l'ordre de 10^{-9} A.

2. — APPLICATIONS

Ampèremètres et voltmètres magnéto-électriques, à cadre mobile, ont même principe que le galvanomètre.

Les ampèremètres, grâce à un jeu de shunts, peuvent être utilisés pour mesurer des intensités plus importantes.

Les voltmètres dérivent des ampèremètres par adjonction d'une grande résistance en série.

3. — PRINCIPE DU WATTMÈTRE ÉLECTRODYNAMIQUE

a) **Couple moteur.**

Considérons un cadre mobile, en fil fin, soumis à l'induction de deux demi-bobines fixes B_1 et B_2 en série parcourues par un courant I (fig. 8). Lorsqu'il est traversé par un courant i, le cadre est l'objet d'un couple moteur M proportionnel au produit Ii, tendant à l'orienter suivant le flux maximal :

$$M = kIi.$$

k, constante dépendant de la géométrie du montage.

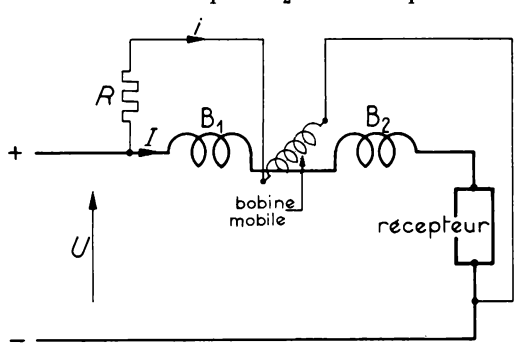


FIG. 8. — Principe du wattmètre électrodynamique : les pièces polaires d'un aimant sont remplacées par deux demi-bobines fixes. La résistance du cadre mobile est très faible devant la résistance totale $\approx R$ du circuit tension.

(1) *Lecture technique* 2, page 75.

Le circuit des bobines fixes, traversé par le courant principal, est dit « circuit intensité » ; branchons le cadre mobile, à travers une résistance additionnelle, en dérivation aux bornes d'un récepteur, soumis à une tension U : ce circuit, de résistance totale R, parcouru par un courant $i = \frac{U}{R}$, proportionnel à la tension, est dit « circuit tension ».

Le couple moteur indique une déviation correspondant à :

$$M = kIi = kI\frac{U}{R} = KP$$

$P = UI$ étant la puissance absorbée par le récepteur et $K = \frac{k}{R}$ une constante du wattmètre utilisé.

b) **Couple antagoniste.**

Le couple antagoniste M', créé par un ressort spiral, est proportionnel à la déviation :

$$M' = C\,\alpha.$$

c) **Expression de la déviation en fonction de la puissance P à mesurer.**

A l'équilibre, le couple moteur est égal au couple antagoniste :

$$M = M'$$
$$KP = C\,\alpha$$

$$\boxed{\alpha = \frac{K}{C}P.}$$

La déviation est proportionnelle à la puissance ; graduons le cadran des déviations en watts : nous avons réalisé un wattmètre électrodynamique.

4. — MESURE DE PUISSANCE

La figure 9 indique le montage d'un wattmètre et son symbole. La valeur d'une division s'obtient en divisant le produit des calibres tension et intensité par le nombre de divisions de la graduation.

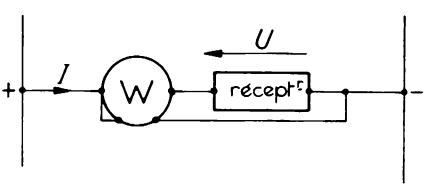


FIG. 9. — Montage du wattmètre pour la mesure de puissance d'un récepteur.

EXEMPLE. — Calibres : $U = 120$ V, $I = 5$ A; graduation : 120 divisions.

La déviation totale correspond à :

$$120 \times 5 = 600 \text{ W}.$$

Chaque division du cadran vaut :

$$\frac{600}{120} = 5 \text{ W}.$$

D. — Exercices résolus

1. *Une tige cylindrique d'aluminium parcourue par un courant de 10 A est disposée sur 2 rails fixes distants de 20 cm dans un champ d'induction constante 0,5 T dirigée de bas en haut.*

1° *Indiquez les grandeurs agissant sur la tige.*

2° *Calculez le travail pour un déplacement de la tige d = 50 cm.*

Solution.

1° La figure 5 (§ B 1)donne les grandeurs B et F agissant sur la tige.

2° La force de Laplace est :

$$F = BIl = 0{,}5 \cdot 10 \cdot 0{,}2 = 1 \text{ N.}$$

Le travail résultant est :

$$W = F \cdot d = 1 \cdot 0{,}5 = 0{,}5 \text{ J.}$$

2. *Le cadre mobile d'un galvanomètre comporte 400 spires rectangulaires, chacune de 2,5 cm de hauteur et de 2 cm de largeur; il est supporté par un fil de torsion de constante* $C = 10^{-5}\ m.N/rd$ *et peut tourner dans un champ radial d'induction 0,2 tesla. Calculer :*

1° *Le couple électromagnétique* M *qui s'exerce sur le cadre quand il est parcouru par un courant de* $5\ \mu A$.

2° *La rotation* α *du cadre.*

3° *La déviation* d *du spot, observée par la méthode optique de Poggendorf, sur une règle graduée placée à* D = 1 *mètre du miroir du galvanomètre.*

4° *La sensibilité du galvanomètre.*

Solution.

1° Moment du couple électromagnétique :

$$M = NSBI = 4 \cdot 10^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ mN.}$$

2° Angle de rotation du cadre :

$$\alpha = \frac{NSBI}{C} = \frac{M}{C} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{10^{-5}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ rd.}$$

En degrés :

$$\alpha = \frac{180 \times 2 \cdot 10^{-2}}{\pi} = 1{,}15^\circ$$

3° Déviation du spot :

$$d = D \operatorname{tg} 2\alpha \approx D \times 2\alpha = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 40 \text{ mm.}$$

4° Sensibilité du galvanomètre :

$$\frac{\alpha}{I} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-6}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ rd}/\mu\text{A.}$$

(Ou encore, on peut déceler une déviation $d = 1$ mm, soit $\frac{5}{40}\ \mu$A $= 0{,}125\ \mu$A, de l'ordre de 10^{-7} A).

PROBLÈMES DE LA LEÇON V

1. Un conducteur cylindrique en aluminium est posé perpendiculairement sur deux tiges conductrices parallèles et horizontales, distantes de 20 centimètres.
Le conducteur est soumis à un champ d'induction uniforme, vertical, de bas en haut $B = 0{,}4$ tesla, et le courant qui le traverse est $I = 10$ ampères.
Sachant que le travail des forces électromagnétiques est $W = 0{,}08$ joule, calculer le déplacement d du conducteur.

Réponse : $d = 10$ cm.

2. Le cadre mobile rectangulaire d'un galvanomètre comporte $N = 100$ spires de fil de cuivre conducteur traversées par un courant $I = 1$ microampère ; ses dimensions sont : côté horizontal : $a = 25$ millimètres ; côté vertical : $b = 40$ millimètres.
Il est soumis a un champ d'induction $B = 0{,}1$ tesla, uniforme et parallèle à son plan.

a) Quel est le moment du couple de forces s'exerçant sur le cadre ?

b) La section du fil des spires est $s = 10^{-3}$ millimètre carré et sa résistivité $\rho = 1{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ωm à la température ordinaire.
Quelle est la valeur de la résistance r du shunt à placer aux bornes du cadre pour que la sensibilité devienne 10 fois plus petite ? On considère que la résistance du galvanomètre est faite de la seule résistance du cadre.

(D'après Bacc. M.; Istanbul.)

Réponses : a) $M = 10^{-8}$ m.N ; b) $r = 23{,}1$ Ω.

3. On veut mesurer l'induction magnétique $\vec{B}$ existant dans l'entrefer d'un électro-aimant à l'aide d'une balance de Cotton.
L'élément actif AB $= l = 2$ centimètres est parcouru par un courant $I = 5$ ampères et introduit dans l'entrefer de façon que les directions de l'induction et du courant soient perpendiculaires (*voir* figure 1 *Lecture techniques*).
Pour rétablir l'équilibre de la balance, rompu sous l'action de la force électromagnétique s'exerçant sur AB, il faut placer dans le plateau une masse $m = 2{,}1$ grammes.

a) Préciser, sur une figure, les directions et sens du courant, de l'induction et de la force.

b) Calculer l'induction $\vec{B}$. ($g = 9{,}80$ m/s^2).

c) Quelle est la précision de cette mesure lorsque m, I, l sont connus à 2 % ?

Réponses : b) $B \approx 0{,}21$ T ; c) 6% et $B = (0{,}206 \pm 0{,}012)$ T.

4. Une tige conductrice en aluminium a une longueur OM $= l = 22$ centimètres et un poids $p = 1$ newton ; elle est suspendue par une extrémité O autour de laquelle elle peut se mouvoir, l'autre extrémité M plongeant dans une cuve remplie de mercure dont le niveau est à 19,6 centimètres au-dessous de O.

1° Lorsque la tige est placée dans un champ horizontal $\vec{B}$ et parcourue par un courant I, elle prend une position d'équilibre $\alpha = 10°$ avec la verticale, comme l'indique la figure ci-contre (on négligera la poussée du mercure sur la tige). Écrire la condition d'équilibre.

2° Sachant que le champ d'induction a pour valeur $B = 0{,}191$ tesla, quelle est la valeur du courant dans la tige ?

On donne cos 10° ≈ 0,98 ; sin 10° = 0,174.

(D'après B. E. I..)

Réponse : 2° $I = 5$ A.

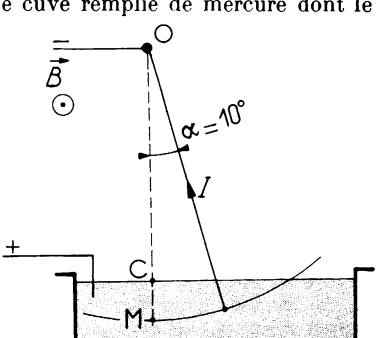


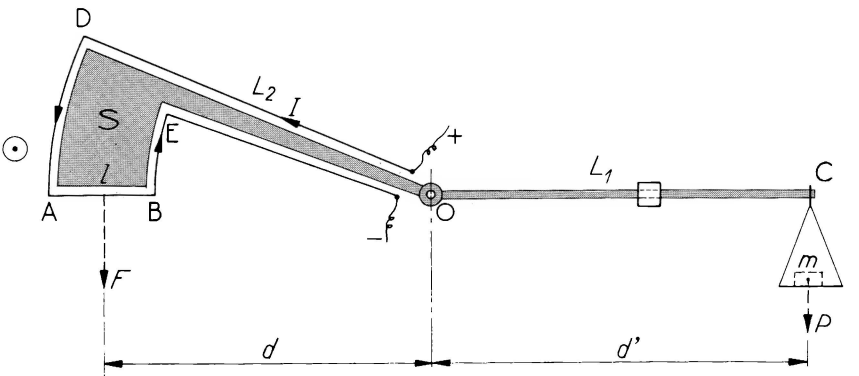
FIG. Pb 4.

LECTURES TECHNIQUES

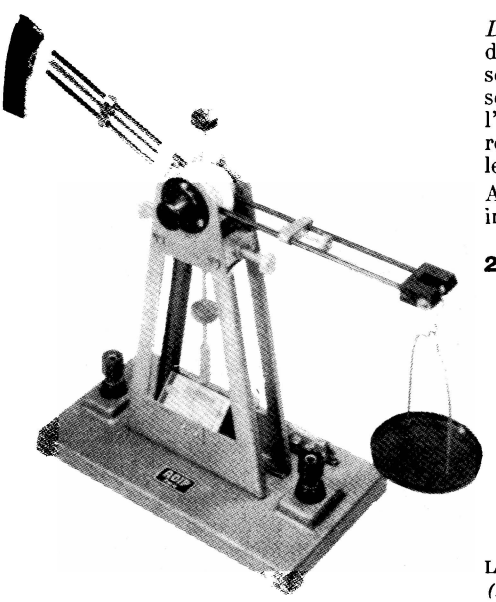
I. — Balance de Cotton [1]

1° Constitution (fig. 1 et 2).

C'est une balance dont le fléau, en matériau amagnétique, est mobile autour d'un axe O et constitué de deux bras de même longueur : l'un L_1 horizontal, l'autre L_2 oblique.



Lectures. FIG. 1.



L_1 supporte à son extrémité C un plateau destiné à recevoir des masses marquées, L_2 se termine par une palette S en forme de secteur circulaire ; cette palette constitue l'élément actif de la balance ; en effet, elle reçoit un ruban de cuivre DABE dans lequel peut circuler un courant.

A l'équilibre, la balance a la position indiquée par la figure 1.

2° Principe.

Un courant I circule de A vers B ; plaçons S perpendiculairement à une induction $\vec{B}$ dont on veut mesurer l'intensité (l'induction allant de l'arrière vers l'avant sur la figure).

a) La portion de conducteur AB = l est soumise à une force F dont la loi de Laplace donne le sens et la grandeur ($F = BIl$) ; cette force déséquilibre la balance.

Lectures. FIG. 2. — **Balance de Cotton.**
(Document A. O. I. P.)

(1) COTTON (1869-1951). Physicien français célèbre pour ses recherches de magnéto-optique.

b) L'équilibre est rétabli sous l'action du poids P des masses marquées disposées dans le plateau ; dans ces conditions, les moments de F et de P par rapport à l'axe sont égaux et l'on a :

$$F\,d = Pd'$$

soit

$$BIl\,d = Pd'$$

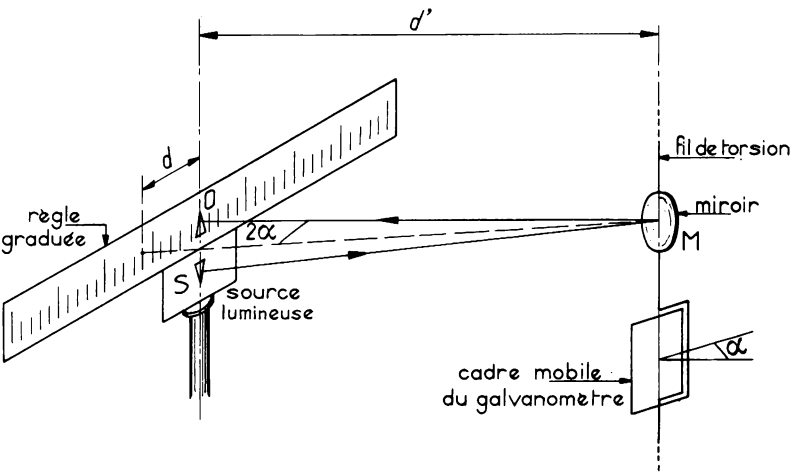
d'où

$$B = \frac{Pd'}{Ild}.$$

On peut donc, avec cette balance, mesurer des inductions magnétiques.

2. — Méthode de Poggendorff

Elle permet de mesurer l'angle de rotation d'un cadre sur lequel est fixé un petit miroir concave M.



Lectures. FIG. 3.

Pour une distance d' judicieusement choisie, M réfléchit sur la règle graduée le rayon lumineux reçu de la source S. On peut ainsi faire coïncider le spot avec l'index O de la règle.

Si un couple électromagnétique fait tourner le cadre mobile du galvanomètre (ainsi que le miroir) d'un angle α, le rayon réfléchi tourne d'un angle $2\,\alpha$, le spot se déplace sur la règle d'une distance d, telle que :

$$\text{tg}\ 2\,\alpha = \frac{d}{d'} \approx 2\,\alpha.$$

Connaissant d, d', on déduit donc $\alpha = \frac{d}{2\,d'}$, puis le courant dans le cadre. Il est ainsi facile de mesurer des courants très faibles, de l'ordre du microampère, par cette *méthode optique*.

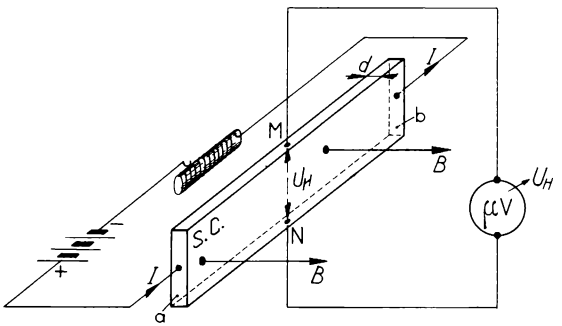
On utilise actuellement des galvanomètres de zéro, par réflexion sur des miroirs, à *échelle repliée* dans *un boîtier*. Ces appareils à lecture par index lumineux sont munis de résistances internes et de bornes destinées à leur utilisation en millivoltmètre ; ils sont associés à des mesures de température par thermocouples, par ponts d'extensométrie (mesures des variations des dimensions d'un solide sous l'effet de contraintes mécaniques), etc.

3. — Sonde à effet Hall

Elle sert à la mesure d'une induction, par lecture directe sur le cadran d'un voltmètre gradué en teslas.

1° Effet Hall.

Considérons une plaquette de métal ou de semiconducteur (1) parcourue par un courant I (fig. 4), entre les faces a et b (métallisées dans le cas d'un semiconducteur). Les points M et N reliés au voltmètre sont équidistants des faces a et b et ne présentent pas de différence de potentiel due à une chute ohmique. Plaçons la plaquette dans un champ magnétique perpendiculaire aux grandes faces : le microvoltmètre indique une différence de potentiel $V_M - V_N = U_H$, appelée *tension de Hall.*



$U_H = V_M - V_N$

Lectures. Fig. 4.

2° Interprétation physique.

Les électrons de conduction sont déviés par le champ (force de Laplace), vers le bas dans le cas de la figure; il en résulte :
— une pénurie d'électrons dans la région du point M;
— un excès d'électrons autour du point N, ce qui explique la tension de Hall.

3° Expression de la tension de Hall U_H.

On constate expérimentalement et la théorie démontre (2) que U_H est proportionnelle à I, à l'induction B et inversement proportionnelle à l'épaisseur d de la plaquette (d parallèle à $\vec{B}$) :

$$\boxed{U_H = R_H \frac{IB}{d}}.$$

R_H, constante de Hall, dépend de la nature de la plaquette; elle est inversement proportionnelle à la densité des électrons de conduction, ce qui explique que U_H n'est assez grande pour servir à des mesures que dans le cas où la plaquette est un semiconducteur.

4° Sonde de Hall.

La plaquette est mince ($d \sim 0{,}1$ mm) et de dimensions, pour un certain modèle : 2,5 × 1,5 en mm; dimensions extérieures (support) : 16 × 4 × 3 en mm.
La sonde comporte quatre sorties : deux pour le circuit du courant, deux pour le circuit tension.
$I_{nominal} = 20$ mA ; on peut mesurer des inductions de l'ordre du tesla et détecter une induction de 2.10^{-3} T.
En raison de ses dimensions réduites, la sonde mesure l'induction pratiquement en un point et rend possible le relevé de la topographie d'un champ.

(1) Exemples les plus connus : silicium, germanium; ils sont étudiés dans le fascicule IV avec leurs applications : diodes, transistors, thyristors...
(2) Voir Mounic : *Semiconducteurs*, 1re Partie.

VI. — INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— batterie de 12 volts ;
— bobine plate de 50 spires en fil isolé de 5/10 mm de diamètre ;
— aimant droit ;
— milliampèremètre avec zéro au milieu de l'échelle ;
— noyau de fer doux droit supportant 2 bobines de 300 et 600 spires;
— rhéostat de 11 ohms ;
— interrupteur.

A. — Courants induits

I. — INDUCTION PAR UN AIMANT

Les deux extrémités d'une bobine plate (fig. 1 *a*) sont connectées aux bornes d'un milliampèremètre, constituant un circuit fermé et passif, c'est-à-dire sans aucun générateur inclus : de ce fait, l'appareil de mesure n'indique aucun courant. Approchons de la bobine le pôle Nord d'un aimant droit : l'aiguille du milliampèremètre dévie légèrement dans un sens, puis revient à zéro.

Éloignons maintenant de la bobine (fig. 1 *b*) le même pôle Nord : l'aiguille du milliampèremètre dévie dans l'autre sens, puis revient à zéro. Recommençons ces deux mêmes opérations d'un mouvement plus rapide : les déviations observées sont plus importantes. Répétons ensuite avec le pôle Sud : on observe des déviations inverses.

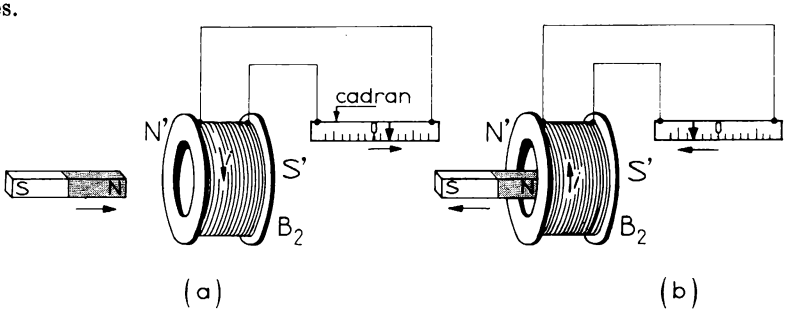


FIG. 1. — Le déplacement de l'aimant crée dans la bobine B_2 un courant induit dont le sens dépend du sens de déplacement du pôle. Le cadran de l'appareil de mesure est seul figuré.

CONCLUSION.

1° *Pendant le mouvement d'approche ou de retrait de l'aimant, un courant* i *décelé par le milliampèremètre, s'est produit dans le circuit fermé.*

2° *Ce courant n'est que momentané, il commence avec le déplacement de l'aimant et cesse avec celui-ci.*

Un aimant peut donc engendrer un courant dans un circuit fermé ne comportant aucun générateur.

2. — INDUCTION PAR UN AUTRE CIRCUIT

Nous utilisons, pour amplifier les effets à observer, deux bobines ayant un nombre assez important de spires, montées sur un même noyau magnétique droit (fig. 2).

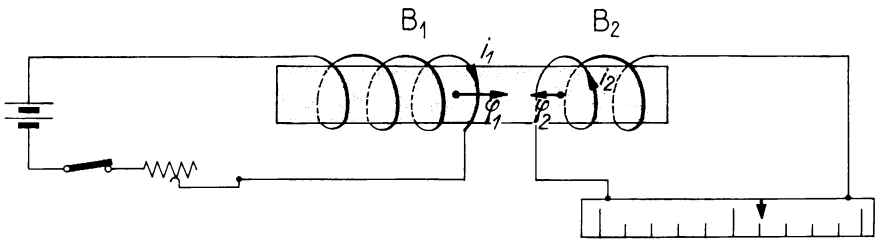


FIG. 2. — **Établissement du courant inducteur** dans la bobine B_1 : i_1 croît, φ_2 est de sens opposé à φ_1.

La bobine B_1 est reliée à une batterie à travers un interrupteur et un rhéostat ; la bobine B_2 est connectée directement à un milliampèremètre ; chaque circuit de bobine est indépendant de l'autre. Réalisons l'une des opérations suivantes :

a) fermeture de l'interrupteur ;

b) accroissement du courant i_1 dans la bobine B_1 par déplacement du curseur du rhéostat ;

c) rapprochement des bobines, l'interrupteur étant fermé.

On observe, pour chacune, au même instant, une déviation du milliampèremètre dans le circuit de la bobine B_2, correspondant à l'apparition d'un courant i_2, tournant en *sens inverse* de i_1. En inversant les opérations précédentes (ouverture de l'interrupteur, diminution de i_1, éloignement des bobines...), on inverse aussi le courant dans B_2 : le milliampèremètre indique un courant i_2 tournant dans le *même sens* que i_1.

CONCLUSION.

1° *A chaque modification du circuit de B_1 correspond un courant dans B_2.*

2° *Ce courant n'est que momentané et ne dure que le temps de la modification sur B_1.*

Toute **variation** d'un courant i_1 dans un circuit — celui de B_1 — peut donc engendrer dans un autre circuit — celui de B_2 — un courant i_2 ; ce courant i_2 n'existerait pas pour i_1 constant.

Ce phénomène qui donne naissance à un courant, indépendamment de toute source, est appelé : **induction électromagnétique.**

Le courant que nous avons produit dans chaque expérience est un courant **induit** ; l'aimant dans le premier cas, le circuit de B_1 dans le second cas, sont dits respectivement « inducteur » ou « circuit inducteur » ; la bobine B_2 dans laquelle a été créé le courant induit constitue le « circuit induit ».

B. — Lois qualitatives de l'induction électromagnétique

Elles indiquent la *cause* du courant induit et son *sens*.

1. — INTERPRÉTATION PHYSIQUE DES EXPÉRIENCES PRÉCÉDENTES

Les opérations effectuées pour produire un courant induit dans B_2 sont toutes différentes ; pourtant elles ont en commun de produire une **variation de flux** à travers B_2.

Reprenons les deux expériences décrites pour observer le mécanisme de l'action des inducteurs :

a) Lorsque nous approchons le pôle Nord de l'aimant de la face d'entrée de la bobine, le nombre des lignes d'induction entrant par cette face va en augmentant : le flux embrassé par la bobine croît.

Si au contraire nous éloignons le pôle Nord de l'aimant de la face d'entrée de la bobine, le nombre des lignes de force entrant par cette face va en diminuant : le flux embrassé par la bobine diminue.

b) Lorsque nous interrompons le courant dans B_1, le flux qui traverse la bobine B_2 décroît jusqu'à zéro; lorsque nous le rétablissons, B_2 est traversé par le flux que lui envoie B_1 et qui croît de zéro à sa valeur de régime.

c) Lorsque nous modifions la position du curseur du rhéostat, dans le sens d'une plus grande résistance, le courant i_1 du circuit inducteur diminue et le flux à travers B_2 diminue ; dans le sens d'une plus faible résistance, le courant i croît ainsi que le flux dans B_2.

Ces observations montrent qu'une force électromotrice induite, et en conséquence un courant induit, naissent dans un circuit électrique fermé, uniquement quand le flux magnétique varie à travers ce circuit ; un flux constant n'induit aucun courant.

2. — PREMIÈRE LOI DE L'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE (loi de causalité)

Toute variation du flux magnétique à travers un circuit fermé y crée un courant appelé courant induit *qui dure le temps de la variation du flux ; si le circuit présente une coupure, seule subsiste la force électromotrice induite.*

3. — COURANTS ET FLUX DANS LES CIRCUITS INDUCTEUR ET INDUIT

a) Le courant inducteur croît dans B_1 (fig. 2) : le courant induit i_2 tourne dans le sens inverse de i_1 ; il en résulte que le flux φ_1 correspondant au courant inducteur croît et que celui φ_2 dû au courant induit i_2 lui est opposé : le courant induit *s'oppose* à l'accroissement du flux inducteur.

b) Le courant inducteur décroît dans B_1 (fig. 3) : le courant induit i_2 est de même sens que le courant inducteur i_1 ; le flux φ_1 du courant inducteur décroît, le

flux φ_2 du courant induit est de même sens ; le flux résultant est la somme des flux de l'inducteur et de l'induit : le courant induit *s'oppose* à la diminution du flux inducteur.

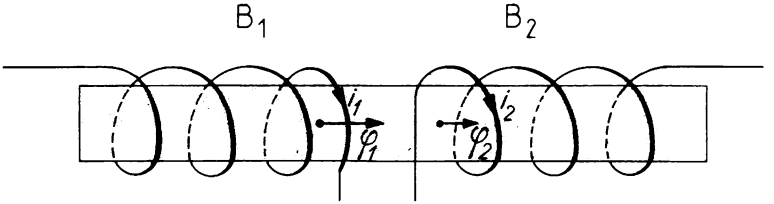


FIG. 3. — **Diminution du courant inducteur :** i_1 décroît; φ_2 est de même sens que φ_1.

Ces résultats sont résumés par la **loi de Lenz** (1).

4. — SECONDE LOI QUALITATIVE : LOI DE LENZ

L'énoncé est le suivant :

Le courant induit est de sens tel que le flux qu'il produit s'oppose à la variation du flux inducteur.

Sous une autre forme, utile pour la suite*:*

Le courant induit est de sens tel qu'il tend à s'opposer à la cause qui lui donne naissance (variation de flux, mouvement...).

REMARQUE.

Au pôle Nord de l'aimant qui s'approche, le circuit présente un pôle Nord, d'où répulsion caractérisée par la consommation d'un travail, par une énergie dépensée par l'opérateur ; au pôle Nord de l'aimant qui s'éloigne, le circuit présente un pôle Sud, d'où attraction et consommation d'énergie mécanique.

L'énergie électrique relative au courant induit s'obtient en dépensant de l'énergie mécanique.

La loi de Lenz n'est qu'un aspect particulier du principe général de la conservation de l'énergie.

C. — Loi fondamentale de l'induction électromagnétique

1. — EXPRESSION DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE INDUITE

a) **Force électromotrice moyenne E pendant un intervalle de temps $t_2 - t_1 = \Delta t$.**

Soit $\Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi$ la variation correspondante du flux inducteur; les mesures et la théorie montrent que $E = \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ (V, Wb, s).

(1) LENZ (1804-1865). Physicien russe célèbre par ses travaux sur les courants induits.

b) **F é.m. induite *e* à un instant *t* donné**

Un intervalle de temps très petit autour de l'instant t se représente en remplaçant Δ par d, soit dt; la très petite variation correspondante de flux s'écrit $d\varphi$ et l'expression ci-dessus : $e = \frac{d\varphi}{dt}$.

Par exemple, si φ varie de $d\varphi = 0{,}02$ Wb en $dt = 0{,}001$ s, son *taux de variation* est $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{0{,}02}{0{,}001} = 20$ Wb/s et $e = 20$ volts.

c) **Conventions de signes.** (fig. 4). On adapte un sens positif sur la normale au circuit, donc pour le flux qu'il embrasse; on en déduit le sens positif des f.é.m. et des courants, tel qu'un courant positif produise un flux propre positif.

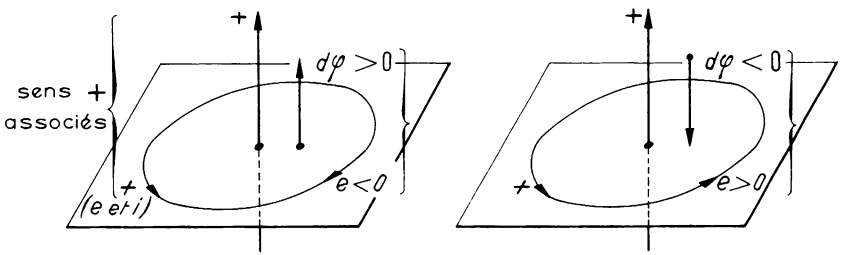


FIG. 4.

Dans ces conventions, la loi de Lenz montre que la f.é.m. induite e et la variation $d\varphi$ du flux inducteur sont de signes contraires, d'où l'expression algébrique :

$$\boxed{e = -\frac{d\varphi}{dt}} \quad \text{(V, Wb, s)}$$

La force électromotrice induite dans un circuit filiforme fermé est égale au taux de variation, changé de signe, du flux d'induction embrassé par ce circuit (Faraday, 1831).

2. — DÉMONSTRATION DANS LE CAS D'UN CIRCUIT INDUIT PUREMENT RÉSISTIF

Pour recueillir dans le circuit induit l'énergie $eidt$, il faut dépenser l'énergie mécanique $dW = -id\varphi$ [1], donc $eidt = -id\varphi$; $e = -\frac{d\varphi}{dt}$.

3. — DÉFINITIONS LÉGALES DU WÉBER ET DU TESLA

L'expression de la f.é.m. induite est l'une des plus importantes de l'électricité ; elle établit un pont entre l'électrocinétique (e) et le magnétisme ($d\varphi$) :

Le **wéber** est le flux magnétique qui, traversant un circuit d'une seule spire, y produit une f.é.m. de 1 volt, si on l'amène à zéro en une seconde par décroissance uniforme.

(1) Relation $W = I\Phi$ (p. 66). Dans le cas présent, $dW > 0$ ne peut être représenté qu'avec le signe *moins*, puisque i et $d\varphi$ sont de signes contraires.

Le **tesla** est l'induction magnétique uniforme qui, répartie normalement sur une surface plane de 1 mètre carré, produit à travers cette surface un flux magnétique total de 1 wéber.

Pour la clarté de l'exposé, nous avons été obligés de considérer l'ordre inverse au chapitre II.

D. — Exercice résolu

Un cadre carré de 0,50 m de côté comporte 50 spires de fil de cuivre dont la résistance totale est 5 Ω ; il peut tourner autour de son axe horizontal à la vitesse de 10 tours par seconde dans un champ magnétique horizontal d'induction 0,1 tesla.

1° *Calculer le flux embrassé par le cadre quand il est vertical et perpendiculaire aux lignes d'induction.*

2° *Calculer la f. é. m. induite moyenne et l'intensité du courant induit moyen pour un déplacement de 1/4 de tour.*

Solution.

1° Flux traversant le cadre : $\Phi = NBS = 50 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}5^2 = 1{,}25$ Wb.

2° Variation de flux : $\Delta\Phi = |\Phi_2 - \Phi_1| = |0 - 1{,}25| = 1{,}25$ Wb.

Durée de la variation de flux pour 1/4 de tour : $t = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{10} = \frac{1}{40}$ s.

F. é. m. induite moyenne : $e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{1{,}25}{\frac{1}{40}} = 50$ V.

Intensité du courant induit : $i = \frac{e}{r} = \frac{50}{5} = 10$ A.

PROBLÈMES DE LA LEÇON VI

1. Une bobine circulaire, formée de $N = 10$ spires de diamètre moyen $D = 10$ centimètres, est placée perpendiculairement à un champ d'induction magnétique $B = 0{,}02$ tesla. Calculer la valeur de la force électromotrice E induite dans la bobine lorsque celle-ci est retournée face pour face en un temps $t = 1/20$ de seconde.

(D'après Bacc. Philo.)

Réponse : $E = 62{,}8 \approx 63$ millivolts.

2. Un cylindre isolant de longueur $l = 50$ centimètres reçoit un enroulement comprenant $N = 250$ spires de fil conducteur uniformément réparties et parcourues par un courant $I = 4$ ampères.

a) Calculer l'induction magnétique B_0 à l'intérieur de l'enroulement.

b) On dispose au centre de l'enroulement, normalement au flux, une bobine plate ayant $n = 50$ spires et une surface $s = 10$ centimètres carrés, les extrémités de cette bobine étant réunies entre elles.

On ramène le courant I à la valeur zéro dans l'enroulement en un temps $t = 5$ secondes.

En admettant que la variation du courant est linéaire, quelle est la valeur de la force électromotrice induite dans la bobine plate ? Quel est le sens du courant induit dans la bobine plate par rapport à I ? Pourquoi ?

(D'après Bacc. A', 1961.)

Réponses : a) $B_0 \approx 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ T ;

b) $e = 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ V ou 25 μV (i de même sens que I).

VII. — INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE :

CONDUCTEUR MOBILE COUPANT DU FLUX

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— un aimant permanent puissant ou un électro-aimant de grandes dimensions (80 cm) ;
— une tige d'aluminium cylindrique ;
— deux supports rectilignes en cuivre servant de rails de roulement ;
— un rhéostat de 62 Ω ;
— un milliampèremètre ;
— une source de 6 à 12 volts.

A. — Conducteur rectiligne en translation dans un champ uniforme

I. — EXPÉRIENCE

L'électro-aimant (fig. 1) que nous utilisons donne un spectre magnétique dont les lignes d'induction sont parallèles et verticales dans l'entrefer (champ uniforme : I § C).

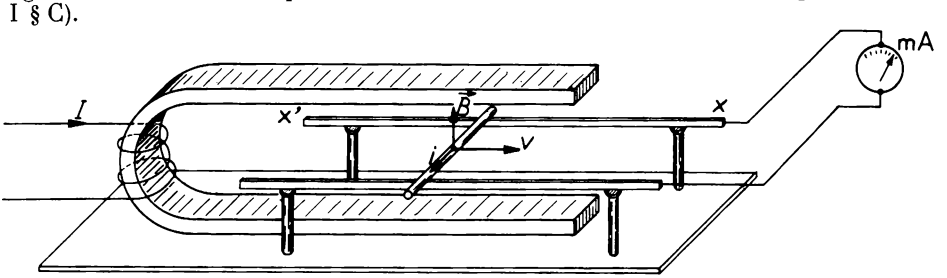


FIG. 1. — Montage expérimental.

Lançons le conducteur cylindrique sur ses supports constitués de deux rails métalliques horizontaux.

Le milliampèremètre dévie dans un sens pour un déplacement du conducteur vers x, dans le sens inverse pour un déplacement vers x' : un courant induit parcourt le conducteur pendant le déplacement ; il est d'autant plus grand que le déplacement est plus rapide.

Quand le conducteur mobile est en $M_1 N_1$ (fig. 2), le flux traversant le circuit a pour valeur Φ_1 ; quand il s'est déplacé pour venir en $M_2 N_2$, le flux est devenu Φ_2 ; la variation de flux pour la durée Δt du déplacement est :

$$\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 ;$$

elle représente le flux coupé (VI § B) ; la partie du conducteur qui coupe du flux constitue le *brin actif* ou *conducteur actif*.

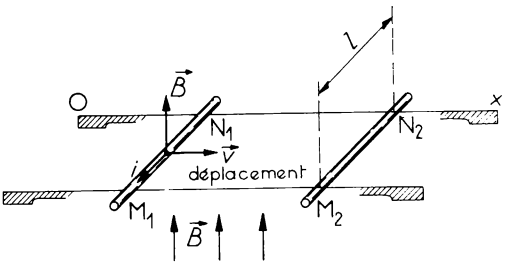


FIG. 2.

2. — LOI DU FLUX COUPÉ

a) Expression de la force électromotrice induite.

La vitesse étant constante, la f.é.m. induite est constante et égale à sa valeur moyenne pendant le déplacement (VI, § D) :

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Or le conducteur se déplace de la longueur $M_1M_2 = v \Delta t$, l'aire balayée est $\Delta S = l v \Delta t$ et le flux coupé :

$$\Delta \Phi = B \Delta S = Blv \Delta t.$$

D'où :

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{Blv \Delta t}{\Delta t} = Blv.$$

$$\boxed{e = Blv} \quad \begin{cases} e \text{ en volt.} \\ B \text{ en tesla.} \\ l \text{ en mètre.} \\ v \text{ en mètre/seconde.} \end{cases}$$

La f. é. m. induite est proportionnelle à :

— l'induction B,

— la longueur l du conducteur *effectivement* soumise au champ,

— la vitesse v de déplacement du conducteur à l'instant t ; si v est constante, e est aussi constante.

b) **Sens du courant induit** (fig. 3).

Si le circuit induit est fermé, la f. é. m. d'induction donne naissance au courant i ; le conducteur actif MN est un générateur.

Le sens de la f. é. m. induite est donné par la règle des trois doigts de la main gauche (main gauche dans le cas générateur) :

Le pouce étant dans la direction de l'induction B, *l'index orienté dans la direction du déplacement du conducteur, le majeur se place naturellement dans le sens suivi par le courant induit.*

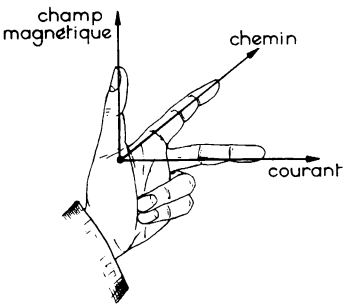


FIG. 3. — Cas du générateur : règle des trois doigts de la main gauche.

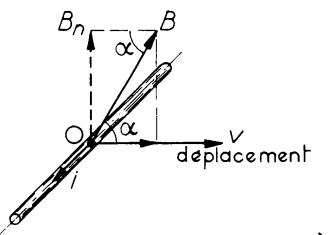


FIG. 4.

REMARQUE.

Dans le cas où le déplacement et l'induction ne sont pas perpendiculaires entre eux (fig. 4), la composante normale $B_n = B \sin \alpha$ intervient seule, et la formule s'écrit $e = B_n l v = (B \sin \alpha)\, lv$, soit :

$$\boxed{e = Blv \sin \alpha.}$$

B. — Conducteur rectiligne en rotation dans un champ uniforme

I. — PRINCIPE

Un conducteur actif AB (fil de cuivre) est disposé suivant une génératrice d'un cylindre en matériau non magnétique (bois par exemple) entraîné en rotation autour de son axe 0 (fig. 5) ; il se déplace d'un mouvement circulaire uniforme de vitesse $\vec{v}$ dans l'entrefer d'un électro-aimant où l'induction est $\vec{B}$: il est donc le siège d'une force électromotrice induite dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main gauche.

Considérons les positions remarquables suivantes :

A : $\vec{v}$ et $\vec{B}$ sont de même sens, $\alpha = 0$ et $e = Blv \sin \alpha = 0$, la f. é. m. est nulle.

B : $\alpha = 90^o$; $\sin \alpha = 1$; donc $e = Blv$, la f. é. m. est maximale, le courant dans le conducteur se dirige vers l'arrière.

C : $\alpha = 180^o$; $\sin \alpha = 0$; $e = 0$, la f. é. m. est à nouveau nulle.

D : $\alpha = 270^o$; $\sin \alpha = -1$; $e = -Blv$, la f. é. m. est maximale, le courant dans le conducteur se dirige vers l'avant.

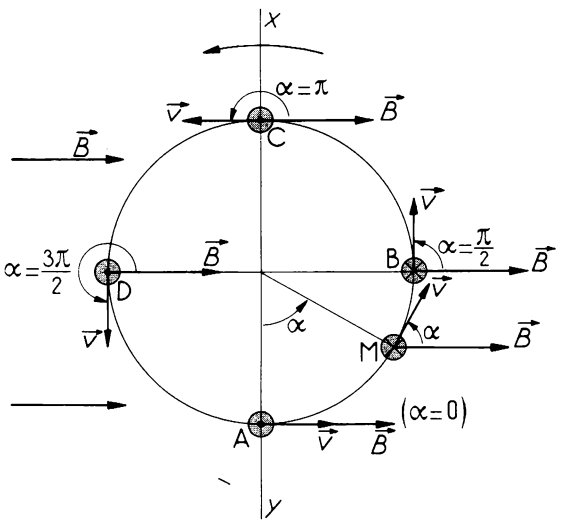


FIG. 5.

En généralisant, pour une position quelconque M, on observe que le vecteur $\vec{v}$ fait avec la direction de $\vec{B}$ un angle α proportionnel au temps, soit $\alpha = \omega t$ où la constante ω est la vitesse angulaire de rotation.

Il en résulte : $e = Blv \sin \omega t$.

2. — REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

Des résultats précédents, on déduit la conclusion suivante :

Le conducteur actif AB est parcouru par une f. é. m. dirigée dans le même sens de l'avant vers l'arrière pour toutes les positions comprises à droite de l'axe *xy*, dans le sens de l'arrière vers l'avant pour toutes les positions comprises à gauche du même axe ; la f. é. m. induite se reproduit identique à elle-même à chaque tour du conducteur actif : *c'est une fonction périodique du temps.* Elle est en plus *alternative* parce que sa valeur, tantôt positive, tantôt négative, a une *valeur moyenne* nulle pendant une période (fig. 6).

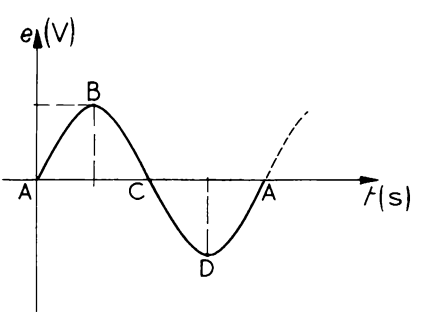


FIG. 6.

REMARQUE.

En réalité, dans les machines électriques, les conducteurs actifs sont disposés sur un cylindre en matériau ferromagnétique, de façon à obtenir une induction beaucoup plus grande et une f. é. m. plus élevée ; la forme du champ est modifiée, mais le principe reste le même.

C. — Exercice résolu

Deux conducteurs rectilignes et parallèles LP et L'P' sont disposés dans un plan horizontal à la distance l = 20 *centimètres l'un de l'autre ; les extrémités L et L' sont réunies. Sur les deux conducteurs peut rouler une barre cylindrique MM' qui leur est perpendiculaire. L'espace compris entre les deux conducteurs est placé dans un champ d'induction magnétique vertical, dirigé de bas en haut, d'intensité* B = *0,5 tesla.*

1° *Calculer, pour un déplacement de la barre à la vitesse de 2 mètres/seconde, la force électromotrice induite.*

2° *En déduire l'intensité du courant si la résistance totale du circuit est de 0,1 ohm. Tracer sur votre figure le sens du déplacement et en déduire le sens du courant.*

Solution.

1° F. é. m. induite :

La longueur utile du conducteur intervient seule :

$$l = 0{,}20 \text{ m.}$$

On a : $$e = Blv = 0{,}5 \times 0{,}20 \times 2 = 0{,}20 \text{ V.}$$

2° Valeur du courant induit :

$$i = \frac{e}{R} = \frac{0{,}20}{0{,}1} = 2 \text{ A.}$$

Sens du courant : un exemple est donné par la figure 2, page 84.

PROBLÈMES DE LA LEÇON VII

1. Une barre cylindrique MN en cuivre est placée perpendiculairement à 2 conducteurs rectilignes, parallèles, horizontaux, repérés de la gauche à la droite respectivement x_1x_2, y_1y_2, et sur lesquels elle peut rouler librement.

L'ensemble est soumis à l'action d'un champ magnétique vertical d'induction dirigée de bas en haut et de module $B = 0{,}5$ tesla.

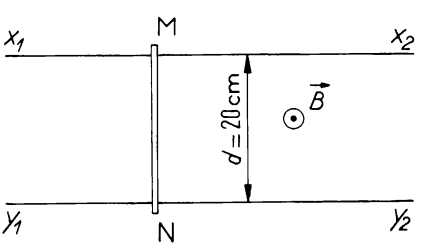


FIG. Pb 1.

a) Deux extrémités x_1, y_1 des conducteurs sont réunies aux bornes d'une source S de force électromotrice $e = 6$ volts (la borne + de la source étant reliée à x_1) : faire un croquis simple, indiquer les grandeurs en présence, préciser leur sens.

b) Les conducteurs ont un écartement $d = 20$ centimètres et constituent avec MN et la source S un circuit fermé de résistance $r = 0{,}5$ ohm. Calculer la force électromagnétique F agissant sur MN.

c) On court-circuite les bornes de S, la résistance r du circuit restant pratiquement inchangée ; puis on déplace la barre par roulement à une vitesse $v = 2$ mètres par seconde de la droite vers la gauche : comment sont modifiés les sens des forces en présence ? Calculer la valeur du courant induit i dans MN.

d) On rétablit la source S dans les conditions de *a* ; quelle est la valeur de l'intensité résultante dans MN :

— si l'on déplace la barre de la droite vers la gauche à la vitesse $v = 2$ m/s ?

— si l'on déplace la barre de la gauche vers la droite à la vitesse $v = 2$ m/s ?

(D'après Bacc. Math.)

Réponses : b) $F = 1{,}2$ N ; c) $i = 0{,}4$ A ; d) 11,6 A et 12,4 A.

2. Un disque métallique mobile autour de son axe O vertical est soumis à l'action d'un champ d'induction qui est normal à son plan et a pour module $B = 0{,}1$ tesla ; il a pour rayon $r = 10$ centimètres et sa périphérie effleure la surface d'une cuve à mercure.

Calculer pour un tour du disque :

— le flux balayé ;

— le travail des forces électromagnétiques, pour un courant $I = 2$ ampères, allant de A vers O (fig. ci-contre).

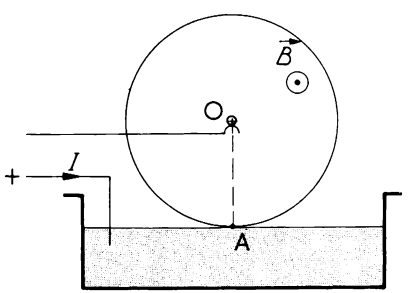


FIG. Pb 2.

Réponses : $\Phi = \pi \cdot 10^{-3}$ Wb ; $W = 6{,}3$ mJ.

3. Une roue de Barlow a pour diamètre $d = 20$ centimètres ; elle est entraînée à la vitesse $n = 360$ tours par minute dans un champ d'induction $B = 0{,}1$ tesla, perpendiculaire à son plan.

Sachant que les rayons en contact avec le mercure se comportent comme des sources en parallèle, la force électromotrice est celle qui prend naissance suivant un rayon.

Calculer :

1° La surface ΔS balayée par un rayon en 1 seconde.

2° La force électromotrice induite.

3° Le courant débité si on ferme le circuit de la roue sur une charge extérieure de 18 mΩ.

Réponses : 1° $\Delta s = 0{,}188$ m². 2° $e = 18{,}8$ mV. 3° $i \approx 1$ A.

VIII. — AUTO-INDUCTION

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— source de 120 volts ;
— rhéostat ;
— lampe à incandescence ;
— bobine à grand nombre de spires et à noyau de fer ;
— résistance de même valeur ohmique que la bobine ;
— commutateur ;
— interrupteur ;
— lime grosse taille ;
— ampèremètre 10 A ;
— oscilloscope cathodique.

L'*auto-induction* ou *induction propre* est la production d'une force électromotrice dans un circuit par la variation du courant qui parcourt le même circuit (1).

A. — Force électromotrice d'auto-induction

I. — MISE EN ÉVIDENCE

Une lampe à incandescence L est montée en parallèle sur une bobine B à noyau de fer, de résistance faible mais comportant un grand nombre de spires. Ce circuit est alimenté par une source de quelques volts débitant, lorsque l'interrupteur K est fermé, un courant continu I se partageant en un courant I_1 dans B et un courant I_2 dans L ; un rhéostat permet d'ajuster les intensités de façon que le filament de L *rougisse à peine* en régime permanent (fig. 1).

— Ouvrons K : la lampe brille d'un très vif éclat pendant un bref instant puis s'éteint.

— Fermons K : la lampe s'illumine encore un bref instant, mais d'un éclat nettement moins vif, puis le filament retrouve son état initial.

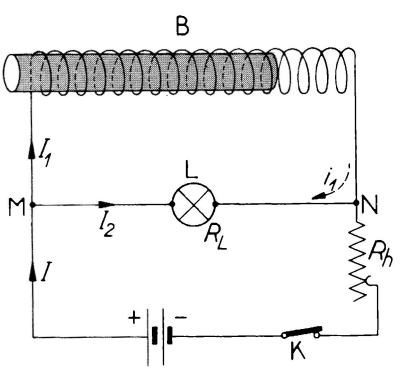


FIG. 1. — Bobine suivant son symbole graphique. Mise en évidence d'une f. é. m. d'auto-induction.

(1) Anciennement *self-induction*, terme anglo-saxon.

2. — INTERPRÉTATION PHYSIQUE

a) **L'ouverture de l'interrupteur K** supprime le courant d'alimentation I ; pourtant la lampe jette un éclair, ce qui prouve l'existence d'un courant de courte durée et supérieur à I_2.

Les leçons précédentes l'expliquent : le flux dans la bobine décroît jusqu'à zéro, d'où un courant induit tendant à s'opposer à cette variation, donc à prolonger I_1.

La f.é.m. induite augmente avec le flux et par suite avec le nombre de spires de la bobine; elle peut être considérablement plus grande que la tension d'alimentation.

b) **A la fermeture de K,** le flux dans la bobine augmente, d'où une f.é.m. antagoniste limitant le taux de croissance de I_1 et I, donc de la chute de tension dans le rhéostat : c'est pourquoi la tension aux bornes de la lampe est, pendant un court instant, un peu plus grande qu'en régime établi.

Des phénomènes analogues s'observent lorsque le courant varie sans s'interrompre.

CONCLUSION.

Toute variation du courant dans un circuit fait varier le flux embrassé par ce circuit et produit une f.é.m. induite, dite d'auto-induction.

B. — Inductance d'un circuit

1. — DÉFINITION DE L'INDUCTANCE

Un circuit est **inductif** quand il produit des effets d'auto-induction non négligeables pour l'application envisagée ; ces effets augmentent avec l'inductance. Par définition l'**inductance** L d'un circuit électrique — encore appelé *coefficient d'induction propre* — est le quotient du flux Φ à travers le circuit par le courant I qui le traverse.

$$\boxed{L = \frac{\Phi}{I}} \quad \text{ou} \quad \boxed{\Phi = LI}$$

Φ en weber.
I en ampère.
L en henry.

2. — UNITÉ

L'unité d'inductance est le ***henry*** (H) : **c'est l'inductance d'un circuit traversé par un flux d'auto-induction de 1 weber quand il est parcouru par un courant de 1 ampère.**

REMARQUES.

— L'inductance d'une bobine dépend de ses dimensions et de la nature du milieu; en particulier, l'effet d'auto-induction est beaucoup plus marqué si la bobine possède un noyau, la variation du flux étant multipliée par la perméabilité relative du noyau.

— L'unité de réluctance (p. 52 : A/Wb) est légalement le henry à la puissance moins un (H^{-1}).

3. — EXPRESSION DE LA f. é. m. D'AUTO-INDUCTION

Les conventions de signes sont toujours celles de la page 81.

A une variation ΔI entre deux valeurs du courant, correspond une variation de flux $\Delta \Phi$ dans le circuit de la bobine telle que :

$$\Delta \Phi = L \Delta I$$

ou encore

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Mais

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Il en résulte

$$\boxed{e = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}}$$

e en volt.
L en henry.
ΔI en ampère.
Δt en seconde.

La force électromotrice d'auto-induction est égale au produit, changé de signe, de l'inductance du circuit par le taux de variation du courant.

EXEMPLE. $L = 2$ H; $\Delta I = 0{,}5$ A; $\Delta t = 0{,}1$ s. Le taux de variation du courant (par rapport au temps) est de 5 A/s et $e = - 10$ V.

Pour $\Delta I = - 0{,}5$ A (diminution), $e = + 10$ V.

C. — Calcul du coefficient *L* pour une bobine longue ou torique

1. — BOBINE SANS NOYAU

Si le flux à travers une spire d'aire S est :

$$\Phi_1 = B_0 S = \mu_0 \frac{NIS}{l}$$

le flux total à travers les N spires de la bobine vaut :

$$\Phi_t = N \Phi_1 = N \mu_0 \frac{NIS}{l} = \mu_0 \frac{N^2 IS}{l}.$$

Or $L = \frac{\Phi_t}{I}$ d'où :

$$\boxed{L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l}}$$

S en m^2
L en H
l en m
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

L'inductance d'une bobine longue ou d'une bobine torique est proportionnelle au carré de son nombre N de spires, à sa section S ; elle est inversement proportionnelle à sa longueur l.

2. — BOBINE A NOYAU DE FER

La bobine possède un noyau de fer de perméabilité relative μ_r et de même section S qu'une spire ; le flux à travers une spire est :

$$\Phi_1 = \mu_r B_0 S.$$

D'où, par un calcul analogue au précédent, la valeur de l'inductance :

$$\boxed{L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2 S}{l}}$$

Bien entendu, L varie comme μ_r, suivant les valeurs de B, donc de I ; lorsque la saturation du fer n'est pas atteinte, on peut admettre que L est constante.

REMARQUE.

Lorsqu'un noyau est fait de tôles minces juxtaposées, la section réelle du fer est inférieure à la section géométrique : la section réelle est égale à la section géométrique multipliée par un nombre inférieur à 1, dit *coefficient de foisonnement.*

D. — Rôles et conséquences de l'auto-induction

1. — RETARD A L'ÉTABLISSEMENT ET A LA DISPARITION DU COURANT DANS UNE BOBINE

Montons en parallèle une résistance morte R et une bobine B à grand nombre de spires dont la valeur ohmique est également R (fig. 2) ; un commutateur K permet de faire débiter la source du circuit principal sur l'une ou l'autre des deux dérivations. L'ampèremètre A indique, pour les positions 1 et 2, la même intensité I en régime normal et permanent ; un oscilloscope cathodique nous permet d'observer l'image du courant.

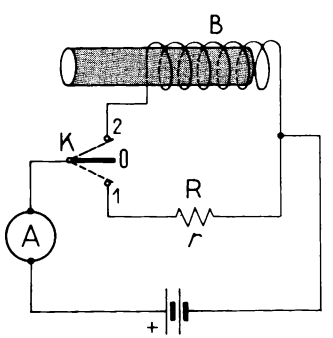


FIG. 2. — Montage permettant de comparer les effets d'une bobine et d'une résistance dans un circuit.

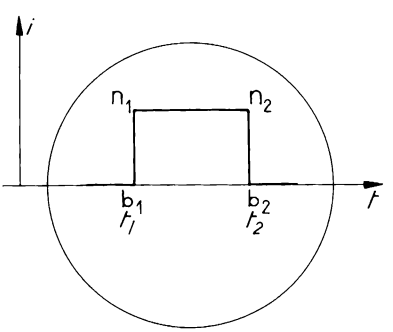


FIG. 3. — Le courant s'établit et disparaît instantanément dans un circuit uniquement résistant.

a) **K en position 1 :** le circuit principal est fermé à l'instant t_1 *sur la résistance R ;* puis ouvrons-le à l'instant t_2 (K en position 0).

L'oscilloscope montre, à l'instant t_1, une montée instantanée du courant ($b_1 n_1$) jusqu'à son intensité de régime ($n_1 n_2$), suivie d'une disparition aussi rapide ($n_2 b_2$) à l'instant t_2 (fig. 3).

b) **K en position 2 :** Fermons le circuit principal à l'instant t_1 *sur la bobine B* et remplaçons la source par un court-circuit à l'instant t_2 (fig. 4). L'oscilloscope montre un retard à l'établissement du courant ($c_1 n_1$) puis un retard à la disparition du courant ($n_2 c_2$).

Il résulte de ces observations que :

— dans un circuit *purement résistant*, le courant s'établit sans retard à sa valeur maximale $\left(I = \frac{E}{\Sigma R}\right)$; de même, il disparaît instantanément quand on ouvre le circuit ;

— dans un circuit *inductif*, l'établissement du courant à sa valeur maximale de même que sa disparition, sont retardés par la f. é. m. d'auto-induction ; ce retard est d'autant plus long que le rapport $\frac{L}{R}$ de l'inductance du circuit à sa résistance est plus grand.

Le rapport $\frac{L}{R}$ s'appelle *constante de temps* du circuit.

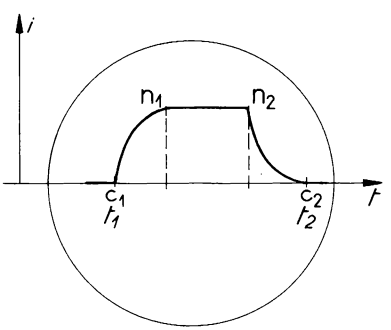


FIG. 4. — Une bobine d'inductance L retarde l'établissement ou la disparition d'un courant, dans le circuit auquel elle appartient.

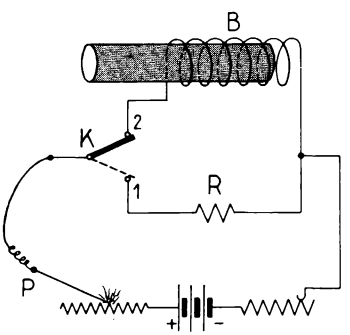


FIG. 5. — Étincelles à la rupture.

2. — ÉTINCELLES DE RUPTURE

a) Expérience.

Modifions le montage de la figure précédente et réalisons celui de la figure 5.

Le déplacement de la pointe mobile P sur la lime produit, à chaque passage d'une dent à l'autre, une série de fermetures et de coupures du circuit :

— **en position 1 :** on observe des étincelles de rupture à peine visibles ; le circuit est uniquement résistant et le flux d'induction qu'il embrasse très faible ;

— **en position 2 :** les étincelles de rupture deviennent longues et brillantes, comme si nous coupions une tension bien plus élevée que celle de la batterie ; elles sont d'autant plus visibles que le noyau est complètement introduit dans la bobine, ce qui augmente L et le flux $\Phi = LI$ embrassé.

b) **Énergie.**

Ces observations montrent qu'une partie de l'énergie électrique fournie par la batterie, non dissipée en chaleur, est emmagasinée dans le circuit magnétique sous forme d'énergie électromagnétique ; l'inductance restitue cette énergie, au moment de chaque rupture.

On démontre que l'énergie emmagasinée par une inductance s'exprime par :

$$\boxed{W = \frac{1}{2} LI^2} \qquad \begin{cases} W \text{ en joule} \\ L \text{ en henry} \\ I \text{ en ampère.} \end{cases}$$

3. — AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'AUTO-INDUCTION

La coupure d'un courant dans un circuit inductif produit, sur les contacts de l'interrupteur, une étincelle prolongée.

Cet effet est utilisé dans les rupteurs de systèmes divers d'allumage électrique.

L'utilisation d'interrupteurs à rupture brusque pour réduire la durée de l'étincelle ou celle de l'arc dans les appareils plus importants, en même temps que ses effets destructeurs, a pour inconvénient d'accroître la force électromotrice d'auto-induction, ce qui est un danger :

— *pour le personnel utilisateur* (électrocution), surtout dans les circuits très inductifs des inducteurs de machines et des enroulements de transformateur ;

— *pour le matériel:* détérioration des isolants entre spires voisines d'un même organe ; des montages anti-inductifs sont utilisés pour le démarrage des moteurs à courant continu (XV, § A 2).

Remarque 1.

On peut comparer l'auto-induction en électricité à l'inertie en mécanique : de même qu'un volant ralentit au départ la vitesse d'une machine tournante, emmagasine de l'énergie cinétique, puis prolonge le mouvement en restituant cette énergie sous forme mécanique après que tout effet moteur a cessé, de même une bobine retarde l'établissement du courant dans un circuit, emmagasine de l'énergie électrique, puis retarde l'instant de la disparition du courant quand le circuit est coupé, en restituant cette énergie par une étincelle prolongée.

Remarque 2.

L'auto-induction joue un rôle bien plus important dans les circuits à courant alternatif, puisque le courant y varie à tout instant.

E. — Exercices résolus

1. *Une bobine a une section droite* S = *30 centimètres carrés ; elle comporte 1 000 spires sur une longueur* l = *50 centimètres. Calculer l'inductance* L *de cette bobine dépourvue de noyau magnétique.*

Solution.

L'inductance L a pour valeur (p. 91) :

$$L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (10^3)^2 \cdot 30 \cdot 10^{-4}}{0{,}5} = 0{,}0074 \text{ H.}$$

2. *Une batterie fournit 1,25 A à un circuit composé d'une bobine ayant* N = *1 200 spires, de longueur* l = *30 cm, la section moyenne étant de 20 cm². On demande la valeur de la force électromotrice d'auto-induction à l'ouverture du circuit provoquée par un interrupteur à coupure brusque, si celle-ci a lieu en 1/25 seconde :*

1° *Lorsque la bobine est sans noyau.*

2° *Lorsque la bobine est entièrement remplie d'un noyau de fer doux dont la perméabilité relative est 350 pour l'induction correspondant à 1,25 ampère.*

3° *Lorsque le noyau est en tôles juxtaposées dont le coefficient de foisonnement est* K_f = *0,95* $\left(K_f = \frac{S_r}{S}, \text{ rapport de la section réelle du fer à la section géométrique du noyau}\right)$.

Solution.

1° Bobine sans noyau :

Remarquons que le diamètre D de la bobine $\left(D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}}\right)$ est :

$$D \approx 5 \text{ cm} \ll l = 30 \text{ cm ;}$$

nous avons donc le cas d'une bobine longue.

On a :

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (12 \cdot 10^2)^2 \, 20 \cdot 10^{-4}}{30 \cdot 10^{-2}} \approx 0{,}012 \text{ H.}$$

Calcul de e lorsque la bobine est sans noyau :

$$e = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{0{,}012 \times (-1{,}25)}{0{,}04} = 0{,}375 \text{ V.}$$

$e > 0$, ce qui signifie qu'elle tend à prolonger le courant.

2° Bobine avec noyau plein :

L'inductance est multipliée par μ_r ainsi que la f. é. m. qui devient :

$$E = \mu_r \cdot e = 350 \times 0{,}375 = 131{,}3 \text{ V} \approx 131 \text{ V.}$$

3° Bobine constituée de tôles empilées :

La section réelle du fer du noyau est multipliée par K_f ; il en est donc de même de l'inductance précédente et de la f. é. m. qui devient :

$$E' = K_f E = 124{,}7 \approx 125 \text{ V.}$$

PROBLÈMES DE LA LEÇON VIII

1. Une bobine alimentée par un courant $I = 10$ ampères est traversée par un flux $\Phi = 0{,}8$ weber. Quel est le coefficient d'auto-induction L de cette bobine ?

Réponse : $L = 80$ mH.

2. L'enroulement d'une bobine de diamètre $D = 4$ centimètres, comporte $N = 2\,000$ spires également réparties sur une longueur $l = 50$ centimètres.

Calculer le coefficient d'auto-induction L de la bobine sans noyau.

Réponse : $L \approx 0{,}013$ H.

3. Une bobine torique a pour dimensions : diamètre extérieur $D = 18$ centimètres ; diamètre intérieur $d = 14$ centimètres ; sa section droite est $s = 4$ centimètres carrés et son enroulement inducteur comporte $N = 1\,000$ spires.

a) Calculer le coefficient L d'auto-induction.

b) La bobine est parcourue par un courant $I = 5$ ampères, que l'on interrompt brusquement en un temps $t = \frac{1}{20}$ seconde.

Calculer la force électromotrice e d'auto-induction.

Réponses : a) $L = 1$ mH ; b) $e = 0{,}1$ V.

4. Une bobine droite B a pour caractéristiques : $N = 200$ spires ; longueur $L = 0{,}40$ mètre ; diamètre $D = 4$ centimètres ; elle est parcourue par un courant $I = 0{,}8$ ampère.

1° Calculer l'induction B_0 au centre de la bobine.

2° On dispose autour de la bobine dans la région médiane, une bobine exploratrice b ayant $n = 10$ spires.

Calculer la force électromotrice e induite dans b si l'on interrompt le circuit de S à l'aide d'un interrupteur à rupture brusque en un temps $t = 1/100$ de seconde.

3° On introduit dans B un noyau de fer doux dont la section est pratiquement la même que celle de l'enroulement.

Que devient l'induction dans le noyau ? Quelle est la force électromotrice e' induite dans la bobine b pour une interruption du courant dans les mêmes conditions qu'au 2° ? (On utilisera le tableau relatif au problème n° 2, leçon IV.)

Réponses : 1° $B_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ T. 2° $e = 0{,}63$ mV. 3° $e' = 1{,}25$ V.

5. Une bobine B_1, en fil fin de section = 10 centimètres carrés, comporte 800 spires. L'enroulement constitue un circuit fermé de résistance 50 ohms. On la dispose de façon que son axe soit horizontal et que le plan de ses spires soit normal au plan du méridien magnétique.

1° Calculer la valeur du flux Φ_1 à travers B_1, dû au champ d'induction terrestre (la composante horizontale du champ terrestre est $B_h = 20$ microteslas).

2° On fait tourner la bobine de 180° autour d'un axe vertical passant par son centre.

a) Quelle est la variation du flux d'induction à travers les spires ?

b) Quelle est la quantité Q_i d'électricité induite ?

3° Un champ d'induction parallèle à l'axe de la bobine B_1, uniforme dans toute l'étendue de cette bobine, d'intensité 4 000 microteslas, est créé au moyen d'une bobine longue B_2, de même axe que B_1 et dont les spires sont parcourues par un courant.

a) Quelle est la valeur du flux Φ_2, dans ces conditions, à travers B_1 ?

b) On fait décroître l'induction proportionnellement au temps : l'induction s'annule au bout de 0,2 seconde.

Quelle est la force électromotrice e induite dans la bobine B_1 ?

(Extrait Bacc. Sc. exp.; Maroc.)

Réponses : 1° $\Phi_1 = 16$ μWb.
2° a) $\Delta\Phi = 32$ μWb ; b) $Q_i = 0{,}64$ μC.
3° a) $\Phi_2 = 3{,}2$ mWb ; b) $e = 16$ mV.

*6. Un tore d'acier, de longueur moyenne l, de section droite constante S, est muni d'un enroulement de N spires parcourues par un courant I. Dans ces conditions, la perméabilité magnétique relative de cet acier est μ.

1° Établir l'expression de l'inductance L de la bobine.

2° On obtient, en coupant ce tore, un entrefer d'épaisseur $e \ll l$.
Quelle est la nouvelle expression L' de l'inductance de la bobine ?

Application : $l = 50$ cm ; $s = 5$ cm² ; $\mu = 1\,500$; $N = 400$ spires ; $e = 1$ mm.

Calculer L et L'.

3° Montrer que la valeur L' pourrait être obtenue sans entrefer, mais avec un matériau de perméabilité relative $\mu' < \mu$.

Exprimer μ' en fonction de μ et du rapport $b = \frac{e}{l}$, puis calculer sa valeur numérique avec les données de la question précédente.

4° On fait passer un courant I' différent de I dans la bobine et il en résulte une variation relative $\frac{\Delta\mu}{\mu}$ de la perméabilité.

a) Exprimer les variations relatives $\frac{\Delta L}{L}$, $\frac{\Delta\mu'}{\mu'}$ et $\frac{\Delta L'}{L'}$.

b) Sachant que $\frac{\Delta\mu}{\mu} = 0{,}10$, calculer $\frac{\Delta L}{L}$ et $\frac{\Delta L'}{L'}$; en déduire que l'entrefer stabilise la valeur de l'inductance de la bobine.

Réponses : 1° $L = \mu\mu_0 \dfrac{N^2 S}{l} = \dfrac{\mu_0 N^2 S}{\frac{l}{\mu}}$.

2° $L' = \dfrac{\mu_0 N^2 S}{\frac{l}{\mu} + e}$; $L = 0{,}30$ H ; $L' = 0{,}12$ H.

3° $\mu' = \dfrac{\mu}{1 + b\mu}$; $\mu' = \dfrac{\mu}{4} = 375$.

4° $\dfrac{\Delta L}{L} = \dfrac{\Delta\mu}{\mu} = 0{,}10$; $\dfrac{\Delta\mu'}{\mu'} = \dfrac{1}{1 + b\mu} \cdot \dfrac{\Delta\mu}{\mu}$;
$\dfrac{\Delta L'}{L} = \dfrac{\Delta\mu'}{\mu} = 0{,}025$; $\dfrac{\Delta L'}{L'} < \dfrac{\Delta L}{L}$.

(*) Le problème n° 6 est d'un niveau supérieur aux précédents.

IX. — COURANTS INDUITS DANS LES MASSES MÉTALLIQUES

COURANTS DE FOUCAULT

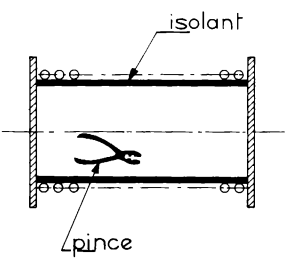
MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

— source de 110 V continu ;
— source de 110 V alternatif ;
— bobine de gros diamètre
— pince métallique ;
— électro-aimant ;
— disque amagnétique plein ;
— disque amagnétique rainuré ;
— poulie ;
— masse pesante.

A. — Existence et définition

I. — EXPÉRIENCES

a) Masse conductrice immobile dans un champ variable.



Une grosse bobine est constituée d'un nombre important de spires enroulées sur un manchon isolant ; plaçons à l'intérieur une pince métallique (fig. 1) et alimentons la bobine avec un courant alternatif : au bout de quelques minutes, la pince est devenue brûlante, on ne peut plus la saisir.

FIG. 1. — Les variations de flux varient au rythme de la fréquence du courant alternatif : la pince métallique s'échauffe rapidement sous l'effet des courants induits qui parcourent sa masse.

b) Masse conductrice mobile dans un champ constant.

Un disque métallique D (fig. 2), plein, amagnétique, peut être entraîné en rotation par une poulie solidaire de son axe horizontal, déroulant un mètre de fil de nylon sous l'action d'une masse *m*. Le disque passe dans l'entrefer d'un électro-aimant en fer à cheval et son plan est perpendiculaire aux lignes d'induction.

— L'électro-aimant n'est pas excité : D prend un mouvement rapide de rotation, uniformément accéléré, et le fil se déroule totalement en 15 secondes.

— L'électro-aimant est excité : un courant I, réglable au moyen d'un rhéostat, alimente la bobine inductrice B. Répétons la même expérience. Le disque D est entraîné, mais nous observons que son mouvement est devenu très lent, freiné ; le déroulement du fil s'effectue en 90 secondes.

— L'électro-aimant est encore excité par le même courant I. seul le disque est changé : un disque D_1 de même matière mais à rainures radiales (fig. 3) remplace le précédent disque D. Sous l'action de m, la vitesse de rotation de D_1 est redevenue très grande.

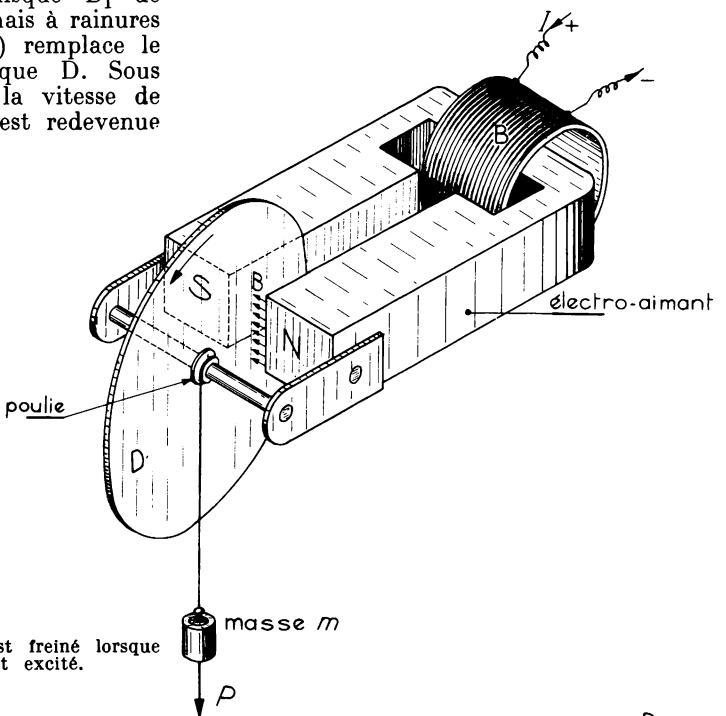


FIG. 2. — Le disque est freiné lorsque l'électro-aimant est excité.

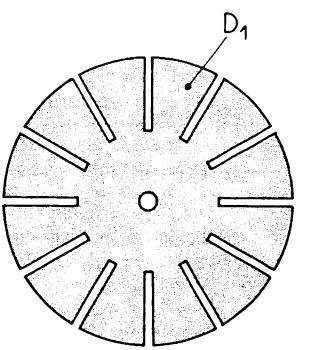


FIG. 3. — Avec un disque à rainures radiales, le mouvement de freinage est atténué ; les courants de Foucault disposant chacun d'une surface très réduite, sont plus petits.

2. — INTERPRÉTATION PHYSIQUE

— Dans l'expérience du § 1 *a*, la pince métallique est soumise au champ alternatif variable qui prend naissance à l'intérieur de la bobine : des courants sont induits dans sa masse et l'échauffent rapidement.

— Pour l'expérience du § 1 *b*, écartons tout de suite l'idée que le freinage du disque puisse être dû à une attraction du métal par l'électro-aimant puisque l'organe mobile a été choisi en matériau non magnétique ; en effet, lorsque l'électro-aimant est alimenté, l'entrefer est traversé par un flux magnétique dont les lignes d'induction sont coupées par le disque plein dans son mouvement de rotation : toute pièce métallique qui coupe du flux est le siège de courants induits qui se développent dans sa masse métallique.

Ces courants s'opposent à la cause qui leur a donné naissance, c'est-à-dire à la rotation du disque, d'où ralentissement.

Notons qu'il n'y a pas arrêt, car il n'y aurait plus alors de flux coupé, donc plus de courants induits.
Avec le disque D_1, les rainures radiales gênent la circulation des courants induits et réduisent leur valeur ; le disque tend à retrouver la vitesse de rotation qu'il acquiert lorsque l'électro-aimant n'est pas alimenté.

3 — DÉFINITION

On appelle **courants de Foucault** (1) les courants engendrés à l'intérieur de masses conductrices par des variations de flux d'induction magnétique.

B. — Propriétés

Ils obéissent aux lois générales des courants et de l'induction électromagnétique ; en particulier, les courants de Foucault :

— **dégagent de la chaleur,** comme tous les courants.

Les masses métalliques qu'ils parcourent s'échauffent (§ A); dans le cas des machines tournantes, il en résulte une perte d'énergie et une diminution du rendement.

— **s'opposent à la cause qui leur donne naissance,** comme tous les courants induits.

En particulier, ils s'opposent au déplacement du disque (§ A) et le freinage électromagnétique obtenu est d'autant plus fort que les courants induits dans la masse sont plus importants.

— **augmentent avec la fréquence des variations de l'induction.**

Plus les variations de flux à travers une masse métallique ont une fréquence élevée, plus les courants induits qui naissent de ces variations sont importants.

En outre, aux fréquences très élevées, leur densité augmente de l'intérieur vers la surface de la masse métallique, ce qui constitue l'*effet pelliculaire* commun à tous les courants variables.

---

(1) FOUCAULT (1819-1868). Physicien français célèbre par ses mesures sur la vitesse de la lumière et ses travaux sur les courants dans les masses métalliques.

C. — Applications des courants de Foucault

1. — AVANTAGES

Ces courants sont utilisés pour :

— le freinage sans frottement mécanique des compteurs d'énergie, du type compteur à induction ;

— l'amortissement des oscillations d'appareils de mesure, du type ampèremètre à cadre mobile ;

— les embrayages par entraînement sans liaison mécanique ;

— le dégagement de chaleur intense : fours à induction pour les traitements thermiques en métallurgie ;

— le chauffage H. F. pour la trempe superficielle (surface durcie accroissant sa résilience, c'est-à-dire sa résistance aux chocs).

2. — INCONVÉNIENTS

Les courants de Foucault sont nuisibles dans les machines tournantes (génératrices, moteurs à courant continu), les machines statiques (transformateurs) dont les carcasses et les noyaux sont soumis à des flux variables : de l'énergie est perdue sous forme de chaleur et la puissance demandée se trouve limitée par une température maximale.

> Les pertes par courants de Foucault dans un conducteur massif viennent s'ajouter aux pertes par hystérésis (III, § D), l'ensemble constituant les *pertes dans le fer* ; il ne faut pas confondre ces deux types de pertes, bien qu'elles se produisent simultanément et qu'il soit difficile de les évaluer séparément.

Les fabricants de tôles donnent globalement les pertes « fer » en watt par kilogramme ; dans les matériaux modernes, elles vont sensiblement de 3 W/kg à 0,8 W/kg selon la qualité.

On parvient à réduire leurs effets néfastes en remplaçant les *pièces massives* par des *pièces feuilletées* (feuilletage), c'est-à-dire des empilages de tôles, isolées au vernis, au papier... et de grande résistivité, dans la réalisation des organes constitutifs des circuits magnétiques. Les feuilles sont *parallèles à l'induction :* chaque feuille constitue un conducteur isolé ne coupant pas de flux et la f.é.m. induite y est nulle.

Les pertes dans le fer doivent être évaluées dans le calcul du rendement des machines, en particulier par la méthode dite *méthode des pertes séparées* (XVI, § C).

En raison de l'épaisseur de l'isolant et des irrégularités de surface des tôles, la section réelle S_r du fer est inférieure à la section géométrique S d'un noyau feuilleté : le rapport $K_f = S_r/S$ est appelé *coefficient de foisonnement* (0,9 pour des tôles isolées au vernis ; 0,95 pour les tôles à structure orientée isolées par traitement chimique).

X. — MACHINES A COURANT CONTINU : GÉNÉRATRICES

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— 1 génératrice bipolaire ;
— 1 génératrice en coupe.

A. — Principe de fonctionnement

Une génératrice à courant continu est une machine tournante qui ***reçoit*** *de l'énergie mécanique* d'un moteur auxiliaire et la ***transforme*** *en énergie électrique* sous forme de courant continu.

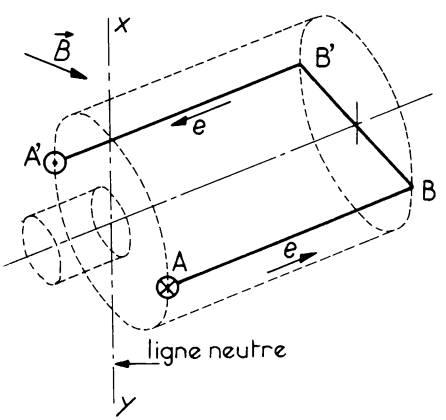
I. — PRODUCTION D'UNE FORCE ÉLECTROMOTRICE INDUITE

Nous avons vu (VII, § B) que lorsqu'un conducteur rectiligne AB est en rotation dans un champ d'induction uniforme auquel il reste perpendiculaire :

— il s'y produit une force électromotrice $e = Blv$;

— cette f.é.m. est alternative ; elle change de sens chaque fois que le conducteur AB coupe l'axe *xy*, appelé *ligne neutre* ;

— le conducteur (AB) est dit *conducteur actif*.



Si l'on considère *une spire* réalisée par l'association de deux conducteurs actifs AB et A'B' diamétralement opposés (fig. 1), les deux forces électromotrices sont de même sens à l'intérieur de la spire et la force électromotrice totale est donc alternative.

La partie arrière BB' de la spire ne coupe pas de lignes d'induction et ne crée pas de force électromotrice : c'est un *conducteur inactif ;* il en est de même pour une liaison avant.

FIG. 1. — Le sens de la f. é. m. dans chaque conducteur actif est donné par la règle des trois doigts de la main gauche.

2. — PRODUCTION D'UNE FORCE ÉLECTROMOTRICE DE POLARITÉ CONSTANTE

Supposons deux demi-cylindres creux rendus solidaires de la spire par ses extrémités A et A′ et deux frotteurs appelés *balais*, disposés diamétralement de part et d'autre de l'axe *xy* ; pendant la rotation de la spire :

— Pour la position 1 des conducteurs (fig. 2 *a*), la f. é. m. induite produit un courant de sens ABB′A′, tel que le balai de gauche a une polarité « positive » et celui de droite une polarité « négative ».

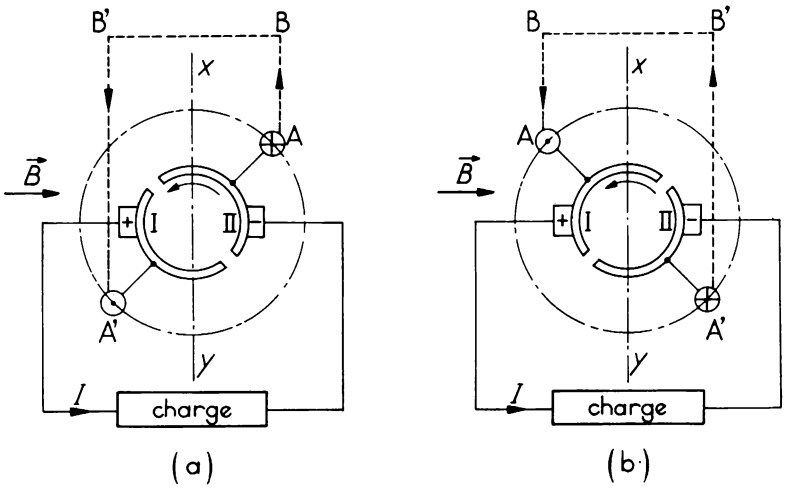


FIG. 2. — *a*) position 1 ; *b*) position 2.

— Pour la position 2 des mêmes conducteurs ayant franchi la ligne neutre *xy* (fig. 2 *b*), la f. é. m. induite produit un courant de sens A′B′BA, le balai de gauche gardant encore la polarité « plus » : le courant a changé de sens dans la spire, mais a conservé le *même sens* dans la charge.

Ce commutateur tournant est appelé ***collecteur :*** par l'intermédiaire des balais, en contact avec les demi-cylindres — *les lames* — il permet d'obtenir dans le récepteur — *la charge* — un courant de sens constant quelles que soient les positions de la spire.

La tension entre les balais est *unidirectionnelle* (fig. 3) et, dans une machine réelle, elle est *continue*, au sens de *constante*.

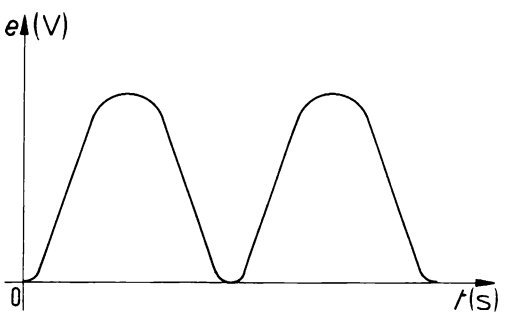


FIG. 3. — Courant unidirectionnel obtenu avec deux lames (cas expérimental).

3. — ASSOCIATION EN SÉRIE DE PLUSIEURS CONDUCTEURS ACTIFS

a) Accroissement de la f. é. m.

En augmentant le nombre de conducteurs actifs, on accroît la f. é. m. et on diminue la profondeur des ondulations du courant ; en effet, la f. é. m. obtenue par chaque conducteur est de l'ordre de quelques centièmes de volt : il faut donc disposer en série un grand nombre de conducteurs pour obtenir les f. é. m. usuelles 120 volts, 220 volts ou plus, des génératrices industrielles.

b) Exemple.

Considérons quatre conducteurs 1-2 et 3-4 diamétralement opposés et deux lames de collecteurs (fig. 4 *a*) ; nous obtenons deux spires en reliant 1 à 4 et 2 à 3 respectivement par les connexions arrière *a* et *b* ; si nous réunissons ensuite, sur la face avant, 4 à 3 par l'intermédiaire de la lame I du collecteur et 2 à 1 par la lame II, nous obtenons un *enroulement fermé*.

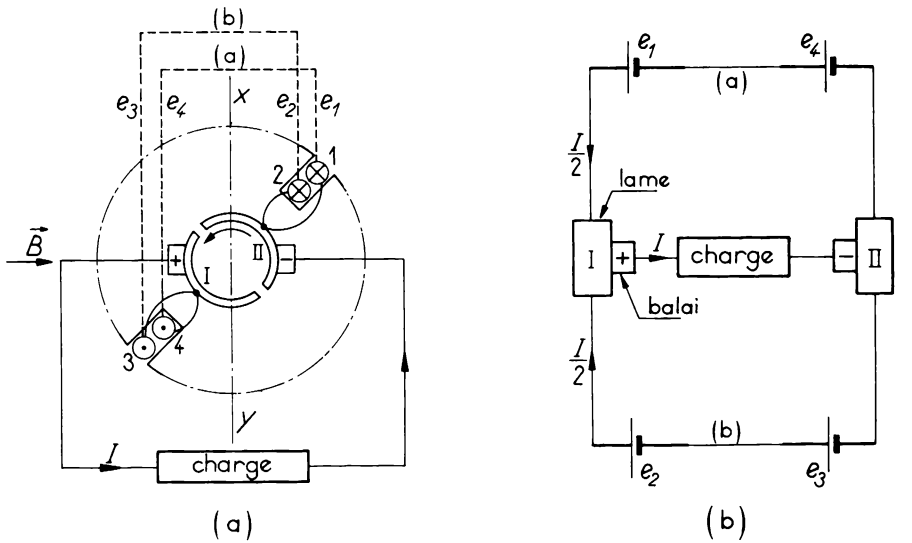


FIG. 4.

a) Les quatre conducteurs en série 1, 4, 3, 2 forment un circuit fermé.

b) Schéma électrique équivalent.

c) Schéma équivalent.

Plaçons alors les balais dans l'axe de l'induction $\vec{B}$, c'est-à-dire l'axe des pôles.

Le schéma équivalent (fig. 4 *b*) montre que l'enroulement est partagé en deux moitiés identiques montées en parallèle sur les balais ; chacune est équivalente à un générateur de force électromotrice : $e_1 + e_4 = e_2 + e_3$.

Si les balais sont réunis à la charge, chaque partie de l'enroulement y débite la moitié du courant I.

B. — Réalisation industrielle d'une génératrice bipolaire

Une génératrice à courant continu comprend deux éléments fondamentaux : ***l'inducteur***, partie fixe (stator) et ***l'induit***, partie mobile (rotor) (fig. 5 et 6).

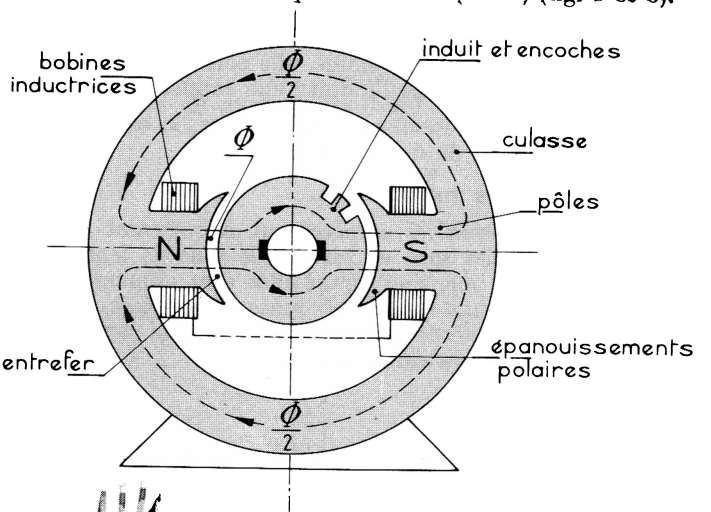


FIG. 5. — Coupe d'une génératrice; éléments du circuit magnétique.

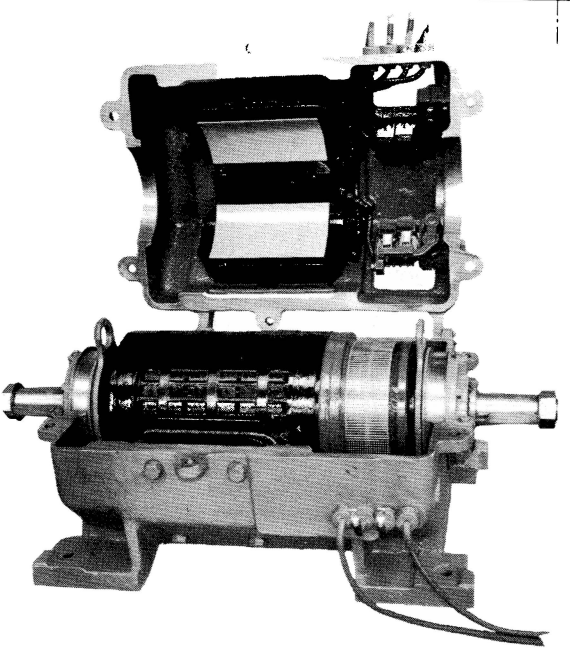


FIG. 6. — Machine à culasse en deux parties laissant apparaître ses organes en position (génératrice à 4 pôles).
(*Document UNELEC.*)

1. — L'INDUCTEUR

C'est l'ensemble *producteur du flux magnétique;* il comprend :

a) **Deux pôles principaux.**

Les pôles sont le plus souvent constitués d'un assemblage de tôles douces ; ils sont terminés par des *épanouissements polaires*, rapportés ou faisant corps avec les pôles et feuilletés pour réduire les pertes (leçon XVI).

b) **Une culasse.**

En fonte ou en acier moulé, elle constitue l'ossature extérieure de la machine dans laquelle tourne l'induit ; elle supporte les pôles et les paliers.

Les pôles et les épanouissements polaires, la culasse, permettent d'amener le flux avec le minimum de dispersion.

c) **Des bobines inductrices.**

Elles produisent les ampères qui magnétisent les pôles sur lesquels elles sont montées ; elles sont en série et le sens de leurs enroulements donne un pôle Nord et un pôle Sud lorsqu'elles sont alimentées par *le courant inducteur* ou *courant d'excitation.* Les bobines inductrices sont réalisées en fil de cuivre recouvert de vernis isolant et isolées de la carcasse et des pôles par de la fibre vulcanisée ou du ruban spécial.

2. — L'INDUIT

C'est l'assemblage des *conducteurs actifs* sur son support tournant ; il comprend :

a) **Un noyau cylindrique.**

Ce noyau est feuilleté, c'est-à-dire constitué de disques découpés à la presse dans des tôles au silicium, empilés et isolés entre eux par une pellicule de vernis, dans le but de réduire les pertes par hystérésis et courants de Foucault ; il est claveté sur l'arbre de la machine. Sa surface extérieure possède des *encoches* ou *rainures* laissant entre elles des *dents* (fig. 7). Un ventilateur en bout d'arbre d'induit améliore la ventilation et le refroidissement de la machine.

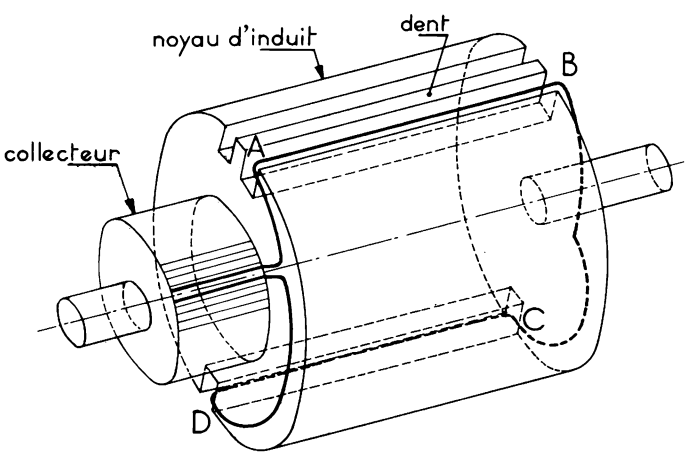


FIG. 7.

L'ensemble de la culasse, des pôles et de l'induit séparés par un *entrefer* de quelques millimètres, constitue le circuit magnétique de la machine.

b) L'enroulement ou bobinage.

Il réalise le couplage des conducteurs actifs en un *circuit fermé* ; il récupère toutes les forces électromotrices dans la marche génératrice ou le courant d'alimentation dans la marche au moteur.

L'enroulement d'induit est logé dans les encoches : en effet, deux encoches diamétralement opposées reçoivent les conducteurs actifs AB et CD, reliées par deux conducteurs inactifs pour former une *spire* de l'enroulement ; en répétant plusieurs fois ce circuit dans les deux mêmes encoches, on réalise une *section*, les côtés de la section étant appelés des *faisceaux* de conducteurs (fig. 8 *a* et *b*).

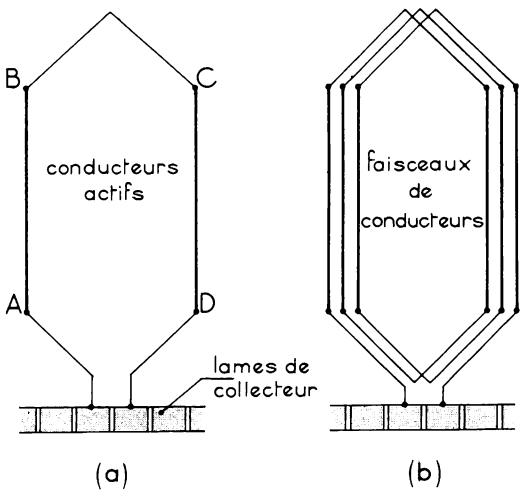


FIG. 8.

a) Une spire.

b) Section et ses deux faisceaux.
Liaisons avant à une lame du collecteur.

Il faut remarquer que :

— les conducteurs sont isolés les uns des autres (1) ainsi que du noyau d'induit ;
— le fil de sortie d'une section et le fil d'entrée de la section suivante sont soudés tous les deux à une même lame du collecteur.

Pratiquement, les sections sont formées à l'avance sur des gabarits, le câbleur n'ayant plus qu'à les mettre en place et à souder les extrémités repérées aux lames du collecteur en suivant le développement de l'enroulement choisi (§ C) ; des *frettes* en fil ou en ruban d'acier maintiennent le bobinage en place et le retiennent contre les forces centrifuges dues à la rotation.

(1) Les conducteurs sont en fil émaillé, ou en ruban guipé verre pour les fortes puissances ; le bobinage est imprégné de vernis époxy (résine synthétique).

3. — LE COLLECTEUR ET LES BALAIS

Ce sont les organes de commutation (1) et de liaison (fig. 9).

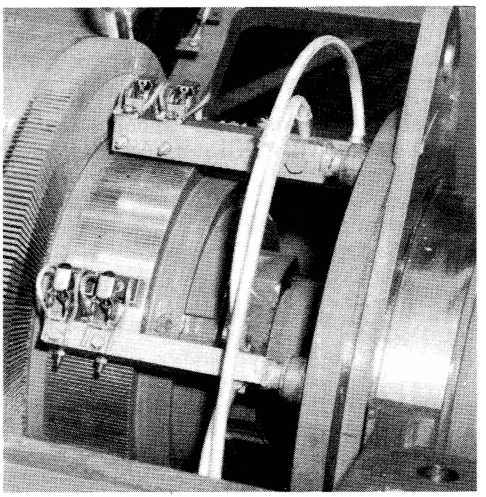


FIG. 9.
Génératrice à courant continu. Observez les balais et le collecteur dont on distingue les lames terminées à gauche par les ailettes.
(*Document UNELEC.*)

a) **Le collecteur.**

Il inverse les liaisons d'une section et de la charge, à chaque passage de cette section sous la ligne neutre, de sorte que la charge est parcourue par un courant continu (§ A 2).

Monté à l'extrémité avant de l'induit et claveté sur le même arbre, il tourne avec l'induit.

Il se compose d'un grand nombre de *lames* de cuivre, de section trapézoïdale ; la base d'une lame est découpée en queue d'aronde pour permettre le montage, l'extrémité côté noyau possède une *ailette* recevant l'entrée d'une section et la sortie d'une autre : il y a autant de lames que de sections. Les lames du collecteur sont séparées par des feuilles de mica qui les isolent aussi de l'arbre de la génératrice.

b) **Les balais.**

Ce sont les frotteurs en contact avec le collecteur, placés diamétralement au voisinage de l'axe des pôles : ils assurent la liaison électrique entre l'induit et le circuit de charge. Les balais, en aggloméré de charbon et graphite, sont disposés dans des *porte-balais* fixés à une couronne réglable sur la carcasse et maintenus par des ressorts de pression.

En résumé :

Une machine à courant continu comporte deux circuits électriques principaux :

— *Le circuit inducteur* ou *circuit d'excitation*, ensembles de bobines créant les ampères magnétisants nécessaires à la production du champ d'induction magnétique.

— *L'enroulement d'induit*, traversé par le courant créé par la génératrice.

Nous les représenterons conventionnellement plus loin (§ C).

(1) Leçon XI, § C.

C. — Exemple de réalisation d'un enroulement d'induit

Les enroulements d'induits sont complexes et leur étude constitue une spécialité ; nous nous bornerons à un exemple simple : **l'enroulement imbriqué pour une génératrice bipolaire.**

Considérons un noyau d'induit à 6 encoches et 2 conducteurs par encoche, avec un collecteur à 6 lames, les 12 conducteurs actifs étant numérotés de 1 à 12 (fig. 10 *a*, *b*).

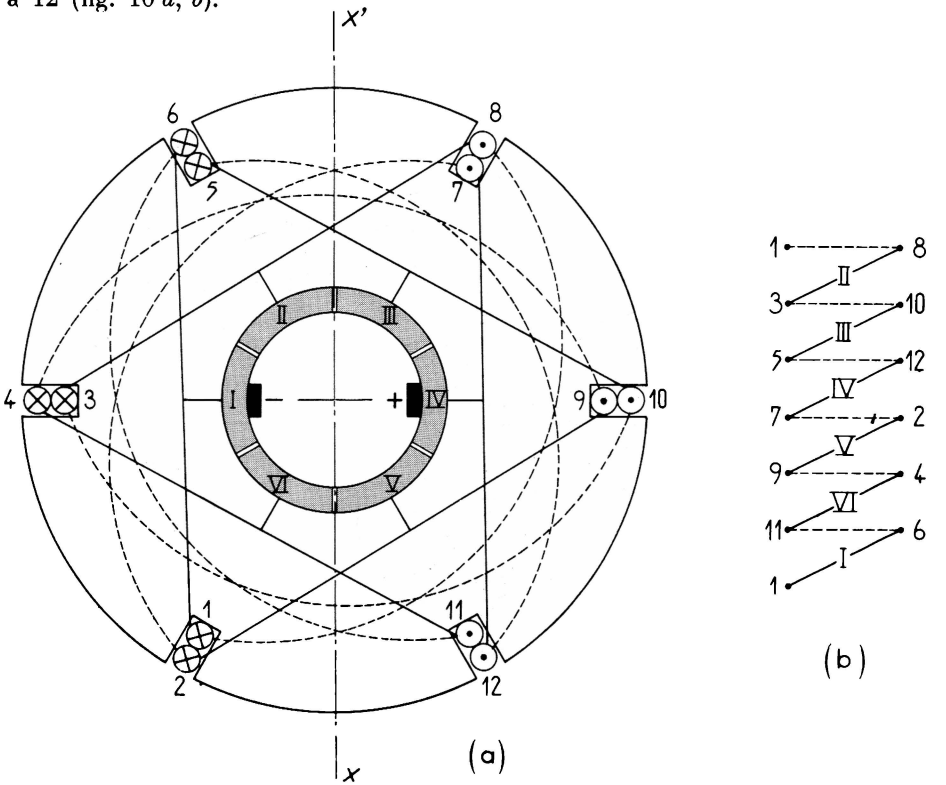


FIG. 10.
a) Représentation frontale d'un enroulement.
En traits pleins : liaison avant côté collecteur ;
En traits pointillés : liaison arrière.
b) Représentation schématisée d'un enroulement.

Réunissons 1 à 8 qui est diamétralement opposé sur *la face arrière*, puis en revenant de 8 à 3 sur *la face avant* en passant par la lame II du collecteur ; puis à nouveau de 3 à 10 à l'arrière et de 10 à 5 à l'avant à travers la lame III, en poursuivant ainsi de suite et jusqu'à fermeture complète de l'enroulement en revenant au conducteur 1 de départ par la lame I.

Cette représentation vue de face, côté collecteur, nous permet d'observer que :

— chaque conducteur est relié à un conducteur à peu près diamètralement opposé ; les deux conducteurs traversent ainsi l'axe neutre *xy* en même temps ;

— chaque liaison est déterminée par une même différence entre conducteurs numérotés, 5 pour la face avant, 7 pour la face arrière : on dit que le ***pas*** de l'enroulement est de 5 avant et de 7 arrière.

Une représentation plane de l'induit, dite *développement panoramique* (fig. 11) donne les positions d'une section par rapport aux autres ; dans l'exemple choisi, les conducteurs actifs à gauche de la ligne neutre sont en trait fort, ceux à droite en trait pointillé ; les liaisons « arrière » sont disposées en haut et les liaisons « avant » en bas. La surface de l'induit est supposée coupée entre les conducteurs 1 et 12.

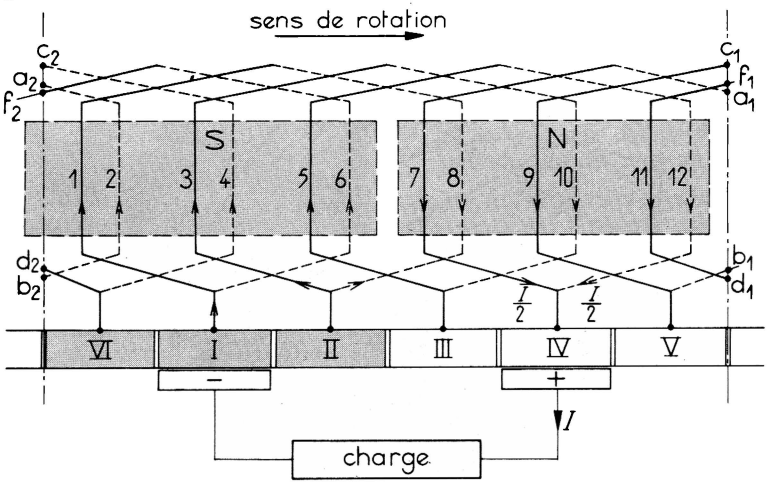


Fig. 11. — Enroulement imbriqué : vue panoramique ; courants sous le pôle S de sens inverse des courants sous le pôle N.

Sur cette représentation panoramique, on constate que :

— toutes les forces électromotrices ne sont pas couplées en série ; à partir du conducteur 7, elles sont de sens contraire à celui trouvé jusque-là ;

— en parcourant l'enroulement, les sections successivement rencontrées I-1-8-II, II-3-10-III, etc., recueillent une force électromotrice e, $2e$, etc. ; seules les lames I et IV ont des conducteurs dont les forces électromotrices sont de même sens et c'est entre elles que la *différence de potentiel est la plus grande :* les balais seront placés sur ces deux lames.

— pour aller d'un balai à l'autre (de la lame I à la lame IV du collecteur), il y a deux parcours possibles ou ***voies d'enroulement ;***

— les six sections de l'enroulement sont couplées par trois en série et les deux séries en parallèle : les deux voies d'enroulement constituent donc deux générateurs *en parallèle*, chacune ne fournissant que la moitié du courant total I débité par la machine bipolaire.

Ce mode d'enroulement est appelé **enroulement *imbriqué*** parce que l'on avance d'une section à la suivante en tournant dans le même sens, chaque section recouvrant partiellement la précédente ; une section embrasse très sensiblement un angle de 180°, on dit que le *pas polaire* est de 180°.

REMARQUE.

Dans les machines de grande puissance :

— On peut disposer côte à côte des enroulements identiques, chacun fermé sur lui-même, en reliant leur face avant à des lames contiguës du collecteur, ces lames étant sous le même balai : l'enroulement est dit *multiple*.

— On utilise parfois deux collecteurs montés de part et d'autre de l'induit et reliés à deux enroulements distincts ; pour un même courant débité, chaque collecteur s'échauffe moins qu'un collecteur unique.

D. — Relations caractéristiques pour une génératrice bipolaire

I. — FORCE ÉLECTROMOTRICE D'UNE GÉNÉRATRICE

a) Par conducteur actif pendant un demi-tour.

Pendant chaque demi-tour d'un même côté de la ligne neutre, un conducteur actif coupe le flux Φ émis par un pôle; pour n tours par seconde, chaque demi-tour dure $\Delta t = \frac{1}{2n}$ seconde. La f. é. m. moyenne dans ce conducteur est alors :

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi}{\frac{1}{2n}} = 2n\Phi.$$

b) Force électromotrice totale de la génératrice.

L'enroulement induit comportant deux voies de chacune $\frac{N}{2}$ conducteurs actifs en série, la f. é. m. résultante de la génératrice est donc :

$$E = 2n\Phi \times \frac{N}{2} = nN\Phi.$$

$\boxed{E = nN\Phi}$ $\begin{cases} E \text{ en volt.} \\ \Phi \text{ en weber.} \\ n \text{ en tours par seconde.} \\ N \text{ nombre total de conducteurs actifs.} \end{cases}$

c) Remarques.

— La f. é. m. instantanée varie dans chaque conducteur avec la position qu'il occupe pendant la rotation, l'induction coupée n'étant pas constante; c'est pour tenir compte de ce fait que nous prenons la f. é. m. moyenne.

— Chaque lame du collecteur pourrait être reliée à chaque section de l'enroulement, mais cette disposition donnerait un collecteur à trop grand nombre de lames. Aussi relie-t-on pratiquement à chaque lame du collecteur un groupe de plusieurs spires voisines (fig. 12) ; lorsqu'un balai touche deux lames consécutives, les spires appartenant au groupe relié à ces lames sont mises en court-circuit par le balai et ne contribuent plus à accroître la f. é. m. utile de la génératrice. Il s'ensuit :

— une forme légèrement ondulée de la f. é. m. instantanée e (fig. 13) ;

— une force électromotrice moyenne inférieure à la valeur théorique $E = nN\Phi$; on écrit : $E = knN\Phi$, k étant un coefficient inférieur à 1.

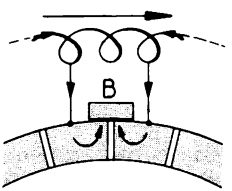


FIG. 12. — B : balai (fixe). En réalité, un balai couvre 3 à 4 lames du collecteur.

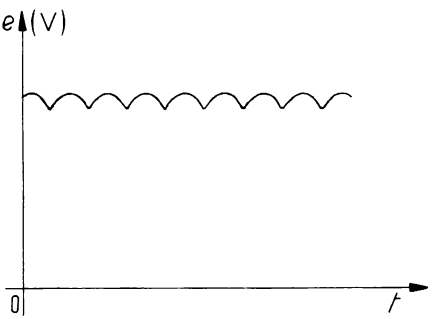


FIG. 13.

d) Exemple numérique; ordres de grandeur.

Génératrice type bipolaire : 220 V ; 13,5 A ; 1 500 tr/mn ; enroulement imbriqué : 24 encoches ; 21 conducteurs par encoche.

On a déduit :

— Nombre de conducteurs actifs : $N = 21 \times 24 = 504$.

— Flux par pôle : $\Phi = \dfrac{E}{nN} = \dfrac{220}{25 \times 504} = 1{,}75.10^{-2}$ Wb.

— Force électromotrice dans un conducteur actif :

$$e = 2\,n\,\Phi = 2.25.1{,}75.10^{-2} \approx 0{,}87 \text{ V}.$$

Le flux par pôle est de l'ordre du centième de weber et la force électromotrice par conducteur actif de quelques dixièmes de volt.

A l'aide d'un moteur à vitesse variable, on entraîne ensuite la génératrice ; on observe :

— pour $n_1 = 750$ tr/mn $E_1 = 110$ V ;
— pour $n_2 = 1\,500$ tr/mn $E_2 = 220$ V.

La f. é. m. est proportionnelle à la vitesse.

2. — TENSION AUX BORNES DE L'INDUIT

La loi d'Ohm relative à tout générateur (Fasc. I ; XI, § C) est applicable à la génératrice à courant continu.

La tension aux bornes U est inférieure à la f. é. m. E ; on a :

$$\boxed{U = E - rI}$$

I étant le courant débité par l'induit et r la résistance interne mesurée à ses bornes.

REMARQUE I.

La relation précédente n'est qu'approchée ; à flux constant et à vitesse constante, la tension U décroît quand le courant I fourni à une charge augmente :

— d'une part à cause du terme rI, appelée *chute interne* ou *chute ohmique* ;
— d'autre part à cause de la *réaction d'induit* (XI, § B).

Le courant induit produit un champ magnétique secondaire s'opposant, dans certaines régions de l'induit, au champ inducteur ; si e est la chute de potentiel due à la réaction d'induit, la tension aux bornes de la génératrice est donnée en toute rigueur par :

$$U = E - rI - e.$$

REMARQUE II.

Dans le bobinage de l'induit, les deux voies d'enroulement sont en parallèle aux bornes des balais ; si r_e est la résistance de tout le fil de cuivre de l'enroulement induit, chaque voie a une résistance $\frac{r_e}{2}$, et la résistance de l'induit correspondant aux deux moitiés en parallèle a pour valeur $\frac{r_e}{4}$.

La résistance interne r mesurée entre balais correspond à cette résistance augmentée de celle des balais et de la résistance de contact balais-lames du collecteur : afin de réduire les pertes, on s'efforce de la diminuer le plus possible.

3. — PUISSANCE ÉLECTRIQUE D'UNE GÉNÉRATRICE

Comme pour tout générateur électrique de f. é. m. E, débitant le courant I, la puissance électrique totale est :

$$P_t = EI.$$

En raison de pertes diverses, P_t est :
— plus grande que la puissance utile de la génératrice ;
— plus petite que la puissance du moteur d'entraînement.

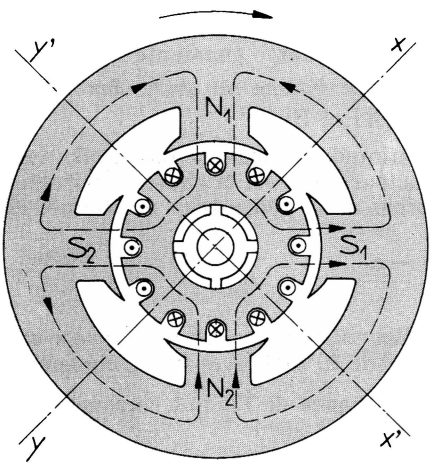
E. — Génératrices multipolaires

1. — LE NOMBRE DE POLES DE L'INDUCTEUR EST SUPÉRIEUR A 2

Pour les puissances supérieures à quelques kilowatts — environ 5 kilowatts — la machine est *multipolaire*, c'est-à-dire possède plusieurs paires de pôles alternativement Nord et Sud, donc en nombre toujours pair; leur expression générale est $2p$, p étant le nombre de paires de pôles :

Pour $p = 2$ la génératrice possède 4 pôles ; elle est dite *tétrapolaire.*
— $p = 3$ — — 6 — ; — *hexapolaire.*
— $p = 4$ — — 8 — ; — *octopolaire.*

2. — LA RÉPARTITION DU FLUX DANS L'INDUIT DÉPEND DU NOMBRE DE POLES



Les lignes d'induction d'un pôle se partagent également entre les deux pôles voisins de nom contraire (fig. 14) ; pour un sens de rotation, la règle des trois doigts de la main gauche détermine le sens de la f. é. m. induite ayant pris naissance dans chaque conducteur. On observera que le flux ne traverse pas le centre de l'induit, ce qui permet de l'évider.

FIG. 14. — Machine tétrapolaire : $2p = 4$; le flux se répartit de façon que la génératrice présente deux lignes neutres décalées de 90°.

3. — LES ENROULEMENTS SONT DE DEUX TYPES POSSIBLES : IMBRIQUÉ ET ONDULÉ

a) L'enroulement imbriqué.

— Le développement est celui exposé pour la génératrice bipolaire (§ C) ; seul le pas polaire est modifié, il est $180°/p$, afin que chaque section soit traversée par le flux maximal de chaque pôle.

— Le nombre de voies d'enroulement $2q$ est égal au nombre de pôles : on a : $2q = 2p$.

Les sections se groupent en autant de dérivations qu'il y a de pôles, chaque dérivation ne fournissant qu'une fraction du courant total débité, la tension étant celle obtenue par l'ensemble des spires de chaque dérivation.

b) **L'enroulement ondulé** (fig. 15).

Le développement des spires donne des ondes successives, progressant *toujours dans le même sens*, d'où le nom d'enroulement *ondulé*.

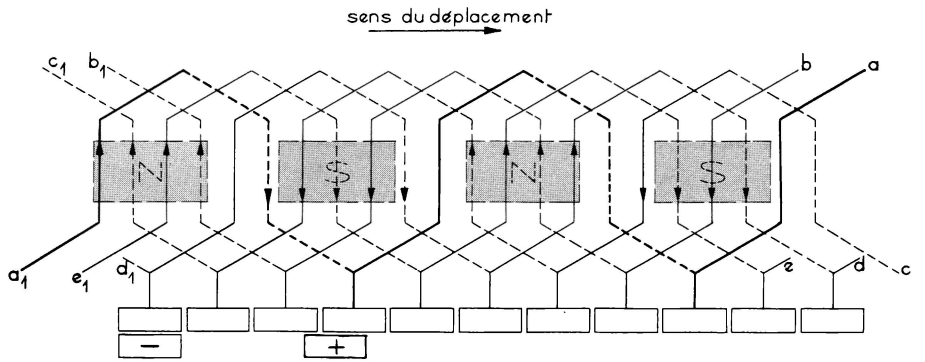


FIG. 15. — Enroulement ondulé.
Exemple d'une machine tétrapolaire : $2p = 4$; pas de l'enroulement = 10.

En choisissant judicieusement le nombre de sections d'enroulement, les pas avant et arrière, le nombre de lames au collecteur, on peut obtenir :

— soit un enroulement *ondulé-série*, si le nombre de voies est égal à 2, c'est-à-dire $2q = 2$;

— soit un enroulement *série-parallèle*, si le nombre de voies est supérieur à 2, c'est-à-dire $2q > 2$.

4. — FORCE ÉLECTROMOTRICE DES GÉNÉRATRICES MULTIPOLAIRES

Pour un conducteur, le flux coupé correspondant à un tour est : $\Delta\Phi = 2p\Phi$.

La f. é. m. induite dans un conducteur est donc, pendant un temps $t = \frac{1}{n}$ seconde

$$e = \Delta\Phi : t = 2p\Phi : \frac{1}{n} = 2pn\Phi \text{ volts.}$$

La f. é. m. totale de la génératrice multipolaire est fonction du type d'enroulement.

a) **Cas d'un enroulement en parallèle.**

Le nombre de voies d'enroulement $2q$ est égal au nombre de pôles $2p$.

Entre deux lignes de balais, il y a $N/2p$ conducteurs en série, donc :

$$E = e \times \frac{N}{2p} = 2pn\Phi \times \frac{N}{2p} = nN\Phi.$$

La force électromotrice a même expression que pour une génératrice bipolaire.

b) **Cas d'un enroulement ondulé-série.**

Quel que soit le nombre de pôles, on a $2q = 2$, soit deux voies d'enroulements. Entre deux lignes de balais, il y a $N/2$ conducteurs en série ; donc :

$$E = e \times \frac{N}{2} = 2\,pn\,\Phi \times \frac{N}{2} = pnN\,\Phi.$$

La force électromotrice est proportionnelle au nombre de paires de pôles.

c) **Cas d'un enroulement ondulé série-parallèle.**

On a : $2p > 2q > 2$.

Il y a $\frac{N}{2q}$ conducteurs par voie ; donc :

$$E = \frac{N}{2q} \cdot 2\,pn\Phi = \frac{p}{q} nN\Phi.$$

La force électromotrice dépend du nombre de pôles et du nombre de voies d'enroulement.

F. — Exercice résolu

L'induit d'une génératrice bipolaire à courant continu a pour dimensions : diamètre 15 centimètres, longueur 20 centimètres ; il comporte un enroulement imbriqué parallèle comptant 60 sections de 12 spires, en fil de cuivre de 2 millimètres de diamètre et de résistivité $\rho = 1{,}7 \cdot 10^{-8}$ *Ωm ; calculer :*

1° *La résistance* R *de l'enroulement.*

2° *La résistance électrique* r *de l'induit, mesurée entre balais.*

3° *La force électromotrice* E *fournie par la génératrice pour une vitesse de l'induit* $n = 1\,800$ *tours par minute, sachant que le flux utile de l'inducteur est 5 milliwebers.*

4° *La tension aux bornes lorsque l'induit débite un courant* $I = 10$ *ampères.*

Solution.

1° La résistance de l'enroulement est donnée par la relation : $R = \rho \frac{l}{s}$.

On a : $\rho = 1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ωm.

On compte : $60 \times 12 = 720$ spires, chacune de longueur $(15 + 20)\,2 = 70$ cm.

La longueur du fil bobiné est donc :

$$l = 720 \times 0{,}70 = 504 \text{ m}.$$

La section est :

$$s = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot 4 \cdot 10^{-6} = \pi \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.$$

On en déduit :

$$R = \frac{1{,}7 \cdot 10^{-8} \times 504}{\pi \cdot 10^{-6}} \approx 2{,}73\ \Omega.$$

2° L'enroulement utilisé est imbriqué parallèle et la machine bipolaire.

Il y a donc deux voies de résistance $\frac{R}{2}$ montées en parallèle ; la résistance de l'induit est alors :

$$r = \frac{R}{4} = \frac{2{,}73}{4} \approx 0{,}68\ \Omega.$$

3° La force électromotrice de la génératrice est :

$$E = nN\,\Phi$$

avec $n = \frac{1\,800}{60} = 30$ tr/s.

$N = 720 \times 2 = 1\,440$ conducteurs actifs.

$\Phi = 5 \,.\, 10^{-3}$ Wb.

On a : $E = 30 \times 1\,440 \times 5 \,.\, 10^{-3} = 216$ V.

4° La loi des générateurs donne :

$$U = E - rI = 216 - (0{,}68 \times 10) \approx 209 \text{ V}.$$

PROBLÈMES DE LA LEÇON X

1. L'induit d'une machine bipolaire tourne à la vitesse $n = 25$ tours par seconde et le flux utile est $\Phi = 0{,}01$ weber.

La force électromotrice est $E = 120$ volts. Quel est le nombre de conducteurs actifs de l'induit ?

Réponse : $N = 480$.

2. Une génératrice bipolaire tourne à la vitesse de 1 500 tours par minute et sa force électromotrice est $E_1 = 120$ volts.

Le flux étant maintenu constant, que vaut la force électromotrice si l'induit tourne à 1 000, puis à 2 000 tours par minute ?

Réponses : $E_2 = 80$ V ; $E_3 = 160$ V.

3. L'induit d'une machine bipolaire tourne à la vitesse de 1 500 tours par minute dans un flux $\Phi = 0{,}01$ weber ; il compte 600 conducteurs actifs et sa résistance entre balais est $r = 0{,}15$ ohm. Calculer

a) La force électromotrice E de la machine.

b) La tension aux bornes de l'induit lorsque la génératrice débite, dans un circuit de charge, un courant $I = 60$ ampères.

c) La puissance électrique totale P_t fournie par l'induit.

Réponses : a) $E = 150$ V ; b) $U = 141$ V ; c) $P = 9$ kW.

4. Une génératrice a pour caractéristiques : $2p = 6$; conducteurs actifs $N = 400$, constituant un enroulement ondulé-série ; vitesse : $n = 1\,500$ tours par minute ; intensité en marche normale $I = 60$ ampères ; flux utile par pôle : $\Phi = 0{,}004$ weber. Calculer :

1° La f. é. m. E de cette génératrice.

2° La densité J de courant dans les fils de l'induit si la section des conducteurs est $s = 15$ mm².

Réponses : 1° $E = 120$ V ; 2° $J = 4$ A/mm².

5. Une génératrice comprend un induit comportant 105 spires et tournant à la vitesse de 1 200 tours par minute entre les pôles d'un électro-aimant produisant un flux de 0,02 weber.

1° Quelle est la force électromotrice de la génératrice ?

2° La résistance totale du circuit fermé que constituent les spires de l'induit est de 0,10 ohm ; quelle est la différence de potentiel aux bornes de la machine quand les spires de l'induit sont parcourues par un courant de 50 ampères ?

3° Quels sont alors le courant débité dans le circuit extérieur et le rendement de la génératrice, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie utilisable dans le circuit extérieur et l'énergie totale du courant que produit la génératrice ?

4° A quelle vitesse faudrait-il faire tourner l'induit pour que la différence de potentiel aux bornes fût de 80 volts lorsque le courant qui parcourt les spires de l'induit est de 100 ampères ?

(D'après Bacc. 1re partie ; Dijon.)

Réponses : 1° $E = 84$ V ; 2° $U = 81{,}5$ V ; 3° $I = 100$ A ; $\eta = 0{,}97$; 4° $N = 1\,214$ tr/mn.

XI. — GÉNÉRATRICE A EXCITATION INDÉPENDANTE

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

— 1 générateur $P \approx 3$ kW ; $U_n = 220$ V ; $I_n = 13{,}6$ A ; $n = 1\,500$ tr/mn ;
— 1 moteur triphasé asynchrone $P = 3$ kW ; 220/380 V ; 11,5/6,5 A ; $n = 1\,460$ tr/mn ; $\cos \varphi = 0{,}8$;
— 1 génératrice $P = 4{,}4$ kW ; $U_n = 110/115$ V ; $I_n = 44/42$ A ; $n = 1\,500$ tr/mn ;
— 1 moteur à vitesse variable $P = 3$ kW ; $I_n = 18$ A ; $U_n = 180$ V ; à excitation séparée commandée par variateur électronique (Dynatrol) ;
— 2 rhéostats 62 Ω ; 3,5 A et 290 Ω ; 1,5 A ;
— 1 tachymètre ;
— des tableaux de charge.

Lorsque le circuit d'excitation est alimenté par un générateur indépendant, la génératrice est dite *à excitation indépendante* ou *séparée* (fig. 1 *a* et *b*) ; les inducteurs sont constitués par des enroulements à spires nombreuses, en fil fin.

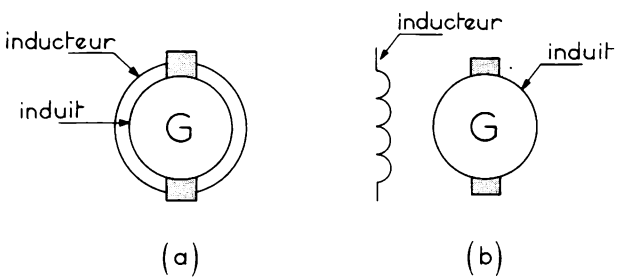


FIG. 1. — **Représentations normalisées.**
Le cercle extérieur symbolise l'inducteur, le cercle intérieur l'induit.

A. — Caractéristiques de fonctionnement

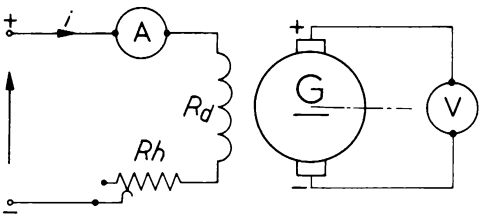
I. — CARACTÉRISTIQUE A VIDE $E = f(i)$ A VITESSE CONSTANTE

a) Définition.

On appelle *caractéristique à vide*, la courbe représentant les variations de la force électromotrice E en fonction du courant d'excitation i, à vitesse de rotation n constante.
Elle est dite *à vide* parce que l'induit ne débite aucun courant.

b) **Tracé de la courbe.**

A l'aide d'un *rhéostat d'excitation* (ou *de champ*), on fait varier progressivement le courant i dans l'inducteur (fig. 2) ; pour chaque valeur i, on relève la valeur correspondante E. Nous avons utilisé une génératrice G dont la plaque signalétique porte les valeurs nominales suivantes (1) :



$$P = 3 \text{ kW} ; \; U_n = 220 \text{ V} ;$$
$$I_n = 13{,}6 \text{ A} ; \; n = 1\,500 \text{ tr/mn}.$$

FIG. 2. — L'induit est entraîné à vitesse constante, l'inducteur alimenté par une source séparée.

Rh, rhéostat d'excitation ; R_d, résistance de l'enroulement inducteur.

L'entraînement est réalisé par un moteur auxiliaire alternatif M ; par valeurs croissantes, de $i_o = 0$ à la valeur maximale $i_m = 1$ ampère, puis par valeurs décroissantes, nous avons obtenu les résultats ci-contre et déduit la courbe de la figure 3.

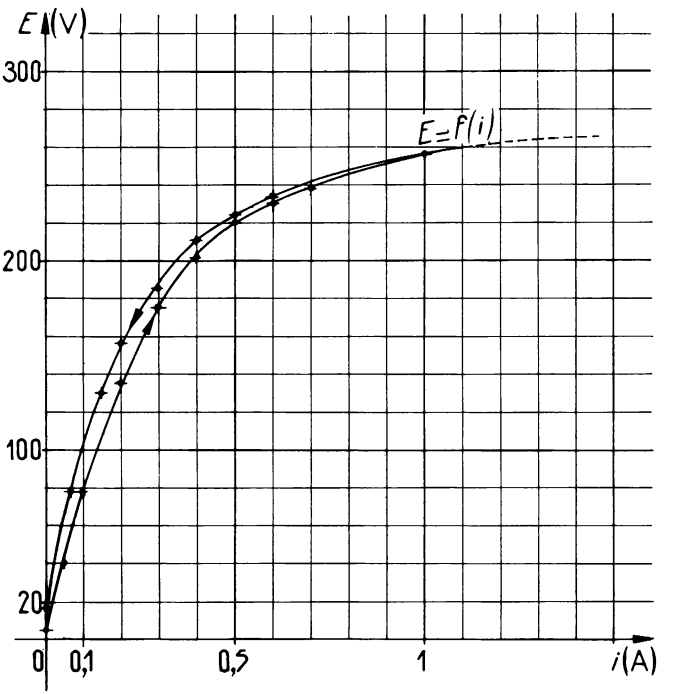


FIG. 3. — $E = f(i)$: courbes de magnétisme ; les flèches donnent le sens de description.

(1) Tension nominale U_n : valeur de tension d'après laquelle les conditions d'isolement et de fonctionnement de la machine sont déterminées.
Intensité nominale I_n : valeur du courant d'après laquelle sont précisées les conditions d'échauffement et de fonctionnement de la machine.

n (tr/mn.)	i (A)	E (V)
1 500	0	6
—	0,05	40
—	0,1	78
—	0,2	135
—	0,3	175
—	0,4	202
—	0,5	220
—	0,6	230
—	0,7	238
—	0,8	245
—	1	256

n (tr/mn.)	i (A)	E (V)
1 500	1	256
—	0,8	246
—	0,7	239
—	0,6	234
—	0,5	225
—	0,4	210
—	0,3	185
—	0,2	156
—	0,15	130
—	0,07	78
—	0	16

La figure 4 donne l'exemple d'un montage pratiquement réalisé au laboratoire.

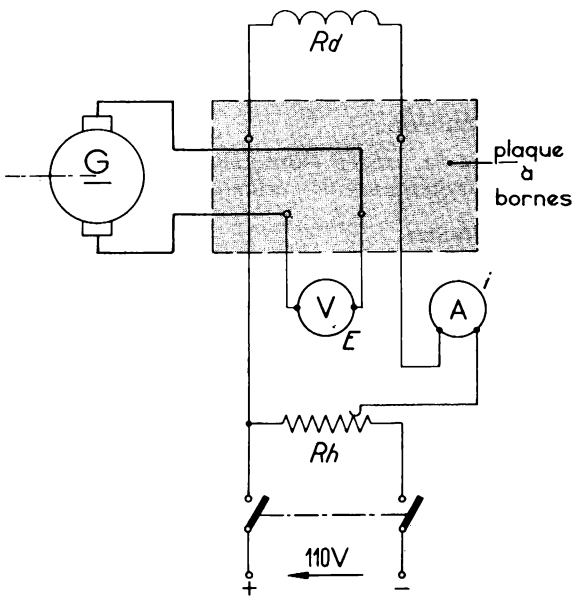


FIG. 4. — Exemple de schéma ; alimentation de l'inducteur par montage potentiométrique.

c) Interprétation physique.

Dans l'expression $E = nN\,\Phi$, n et N sont des constantes, le flux Φ est fonction de l'induction B, c'est-à-dire du courant d'excitation i ; donc E est, à une constante près, la fonction $\Phi = f(i)$ ou encore $B = f(H)$ représentée par la *courbe de magnétisation.*

La courbe relevée montre que :

— Lorsque l'excitation est nulle, le flux n'est pas nul ; le circuit magnétique conserve une faible *aimantation rémanente.*

— Pour des valeurs faibles de l'excitation, le circuit magnétique n'est pas saturé : E est proportionnelle à i ; pour des valeurs de plus en plus grandes, E augmente très peu, il y a saturation.

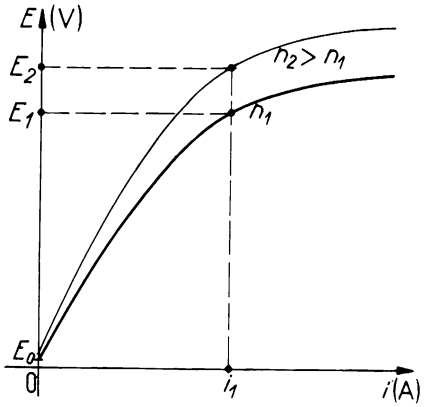


FIG. 5.

REMARQUE 1.

— Inversons le sens de rotation de la génératrice en changeant celui du moteur : la déviation du voltmètre s'inverse, la force électromotrice a changé de sens.

— Inversons le sens du courant dans l'inducteur, la force électromotrice change encore de sens.

REMARQUE 2.

A chaque vitesse de rotation n correspond une caractéristique à vide ; la caractéristique relative à $n_2 > n_1$ est au-dessus de la courbe relative à n_1 (fig. 5).

2. — CARACTÉRISTIQUE DE VITESSE $E = f(n)$ A EXCITATION CONSTANTE

a) Définition.

C'est la courbe exprimant la variation de la force électromotrice E de la génératrice à vide en fonction de la vitesse n, à courant d'excitation i constant.

b) Principe.

La génératrice est entraînée par un moteur à courant continu dont on peut faire varier la vitesse ; le courant inducteur est réglé à une valeur déterminée, puis l'on fait varier la vitesse du groupe, par exemple de 100 tours par minute en 100 tours par minute jusqu'à la vitesse nominale : pour chaque valeur de la vitesse, on relève la valeur correspondante de E aux bornes de l'induit de la génératrice ; on en déduit la courbe $E = f(n)$.

Le schéma (fig. 6) indique le montage réalisé ; nous avons utilisé :

— une génératrice $P = 4{,}4$ kW ; $U_n = 110/115$ V ; $I_n = 44/42$ A ; 1 500 tr/mn en excitation séparée ;

— un moteur $P = 3$ kW alimenté par un redresseur à partir du secteur alternatif, à vitesse variable de 75 à 1 500 tr/mn ; 18 A - 180 V ; à excitation séparée 0,7 A - 200 V commandée par variateur électronique.

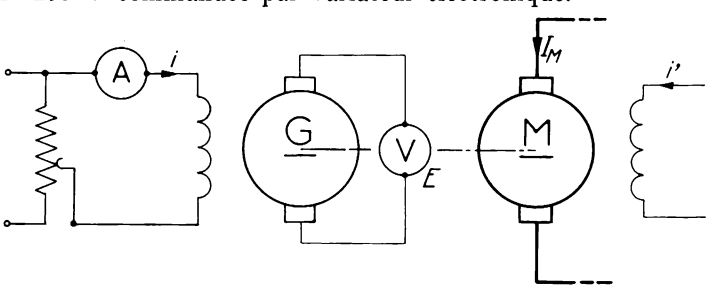


FIG. 6. — Le moteur M entraîne la génératrice ; le courant I_M est réglable par un dispositif à commande électronique : pour chaque caractéristique $E = f(n)$, i est constant.

c) **Résultats obtenus.**

Nous avons obtenu, pour l'excitation $i = 1{,}6$ A, les valeurs numériques suivantes :

$E_{(V)}$	32,5	42	50	61	70	80	92	102	110	120	130
$n_{(tr/mn)}$	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300

d) **Courbe $E = f(n)$.**

Elle est donnée par la figure 7 : c'est une droite passant par l'origine ; ce qui signifie qu'à flux constant, E est proportionnelle à n.

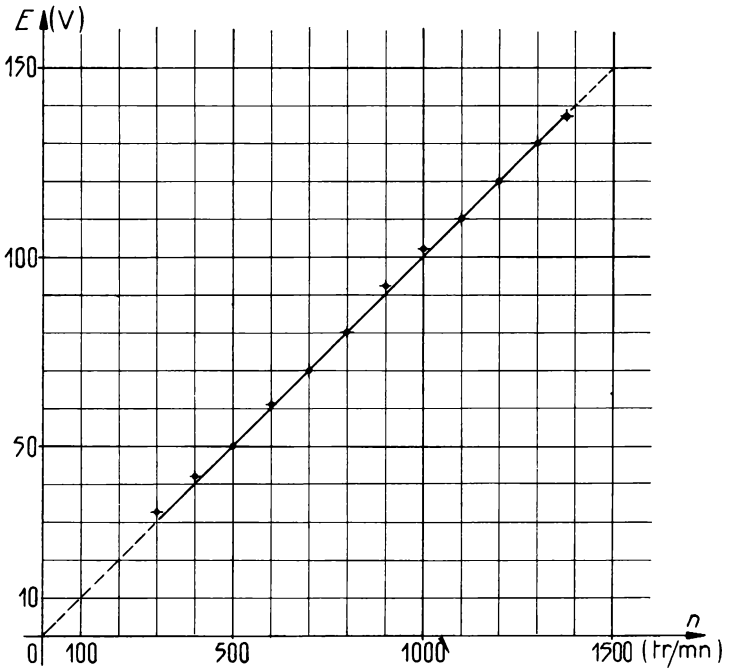


FIG. 7. — Caractéristique $E = f(n)$.

Conclusions.

Lorsqu'un courant parcourt l'inducteur de la génératrice et que son induit tourne :

— Une f. é. m. prend naissance aux bornes de l'induit ; elle croît avec le courant dans l'inducteur.

— Cette f. é. m. change de sens si l'on inverse, soit le sens de rotation de l'induit, soit le sens du courant dans l'inducteur.

— La f. é. m. E est proportionnelle à la vitesse de rotation n de l'induit.

Ces résultats sont conformes à l'expression : $E = nN\Phi$ démontrée (X, § D).

3. — CARACTÉRISTIQUE EN CHARGE : $U = f(I)$

a) Définition.

On appelle *caractéristique en charge* la courbe de la tension U aux bornes de l'induit en fonction du courant I débité dans la charge, à excitation i et vitesse n de rotation constantes.

b) Principe.

Un circuit *de charge* est disposé aux bornes de l'induit : il est formé par un ou plusieurs tableaux de fils résistants boudinés montés en parallèle. Le schéma (fig. 8) précise le montage.

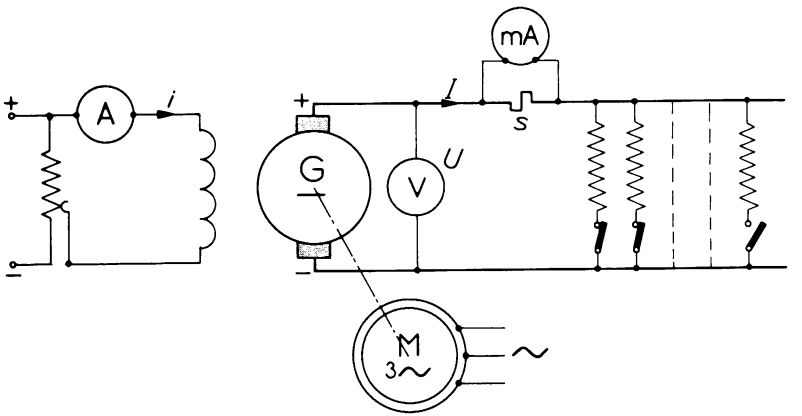


FIG. 8. — Relevé de la caractéristique $U = f(I)$: schéma du montage. On désigne par *charge* d'une machine la puissance utile qu'elle fournit

La tension à vide est réglée à 1,1 U_n, de façon à obtenir sensiblement U_n à pleine charge. Nous faisons débiter des courants croissants de 0 à I_n, valeur nominale du courant de la machine, en diminuant la résistance de charge, c'est-à-dire en augmentant le nombre de résistances en parallèle, et ceci en maintenant constants le courant d'excitation et la vitesse de rotation de la génératrice.

Pour chaque valeur du courant I débité, on note la tension U correspondante aux bornes de la génératrice.

c) Résultats numériques.

Pour la génératrice utilisée au § 1*b* ($U_n = 220$ V), nous avons relevé les points correspondants aux charges suivantes : 0, $P/4$, $P/2$, 3 $P/4$, P, 5 $P/4$, où P est la puissance nominale.

La tension à vide étant réglée à la valeur $E = 240$ volts, l'excitation à la valeur $i = 0{,}77$ A et la vitesse à $n = 1\,500$ tours par minute ; nous avons obtenu :

$I_{(A)}$	0	3,5	7	10	13,5	17
$U_{(V)}$	240	236	232	228	224	219

d) Courbe $U = f(I)$.

Elle est donnée par la figure 9 et montre que :

la tension U *aux bornes de l'induit décroît quand le débit* I *augmente.*

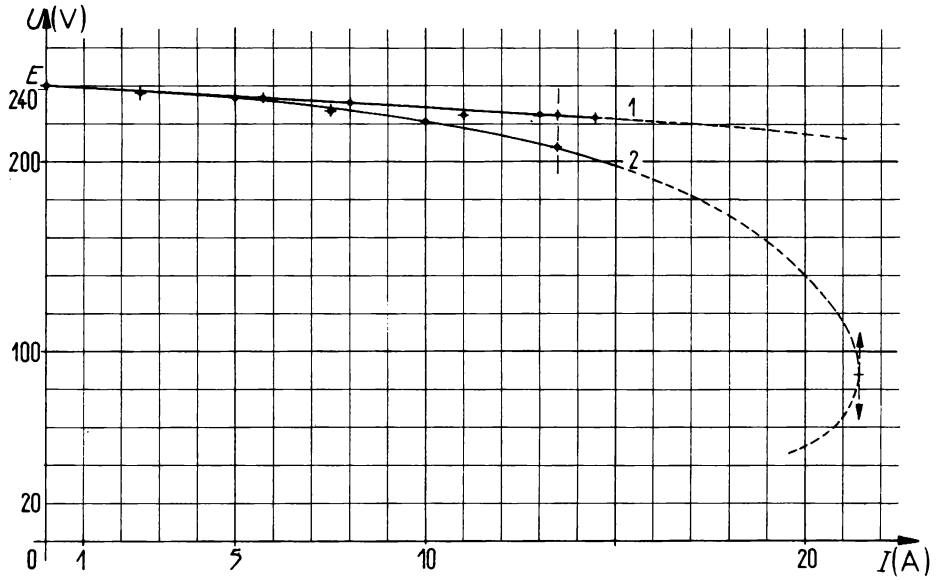


FIG. 9. — Caractéristiques en charge $U = f(I)$; (1) à excitation séparée ; (2) à excitation en dérivation. Nous renverrons à cette figure lors de l'étude de la génératrice à excitation en dérivation (p. 139 et 140).

4. — CHUTE OHMIQUE ; RÉACTION MAGNÉTIQUE D'INDUIT

a) Définition.

La chute totale de tension dans l'induit est la différence $E - U$ entre la f. é. m. E et la tension aux bornes U ; elle est la somme de :

— *la chute ohmique* (1) due à la résistance r du bobinage induit ; elle est égale au produit de la résistance de l'induit mesurée à chaud par les différentes valeurs du courant, soit rI, et a pour représentation une droite ;

— *la réaction d'induit e* (§ B) due au flux du courant débité (p. 127).

On a donc :

$$e = (E - U) - rI.$$

b) Exemple numérique.

Avec la génératrice utilisée au paragraphe 1 *b* — les pôles auxiliaires (§ C) ayant été éliminés — nous avons obtenu :

(1) Plus précisément *chute résistive*, car dans les machines à courant alternatif, il faudra considérer la chute inductive qui est aussi « ohimique ».

$I_{(A)}$	$U_{(V)}$	$E - U_{(V)}$	$rI = 1{,}3\,I_{(V)}$	$e = (E - U) - rI_{(V)}$
0	240	0	0	0
2,5	232	8	3,25	4,75
5,5	222	18	7,15	10,85
7,5	212	28	9,75	18,25
10	201	39	13,0	26
12,5	193	47	16,25	30,75

d'où les courbes de la figure 10

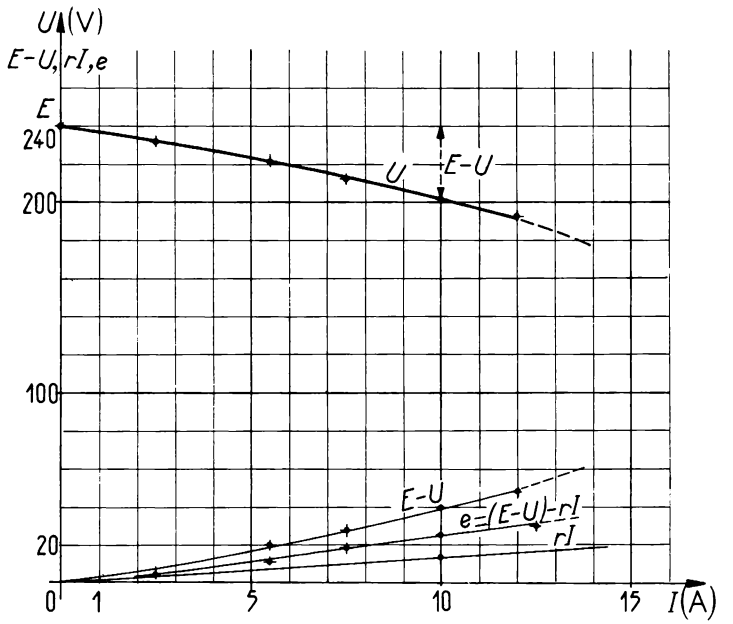


FIG. 10. — $U\,(I)$: caractéristique en charge ; E-U : chute totale ; rI : chute ohmique ; e : réaction d'induit supérieure à rI pour cette génératrice déjà ancienne.

La résistance de l'induit a été mesurée à chaud par la méthode voltampèremétrique (montal aval) ; nous avons trouvé $r = 1{,}3$ ohm.

Conclusion.

La loi d'Ohm $U = E - rI$ des générateurs électrochimiques ne s'applique pas aux générateurs tournants (électromagnétiques), puisqu'ils sont le siège d'une réaction magnétique d'induit provoquant la chute e ; on a donc en toute rigueur :

$$U = E - rI - e.$$

Toutefois dans les machines modernes, la réaction magnétique d'induit e est faible, de l'ordre de deux pour cent de la force électromotrice E de la génératrice ; on la néglige parfois pour simplifier les exercices (voir aussi p. 130 : enroulement de compensation de la réaction d'induit).

B. — Réaction d'induit

C'est l'ensemble des phénomènes magnétiques résultant du passage du courant dans les enroulements induits.

1. — LE COURANT INDUIT PRODUIT UNE FORCE MAGNÉTOMOTRICE

En effet, chaque conducteur actif parcouru par le courant induit donne naissance à son propre flux. Conformément à la loi de Lenz, les effets de ce flux tendent à s'opposer à la cause qui lui donne naissance, c'est-à-dire au flux inducteur.

La figure 11, montre, de façon très schématique, les lignes d'induction 1 du champ inducteur B et les lignes d'induction 2 du champ de réaction d'induit B_r. Dans l'entrefer, ces inductions sont perpendiculaires au fer, c'est-à-dire radiales; elles se retranchent à l'entrée d'un pôle (point M) et s'ajoutent à sa sortie (point N).

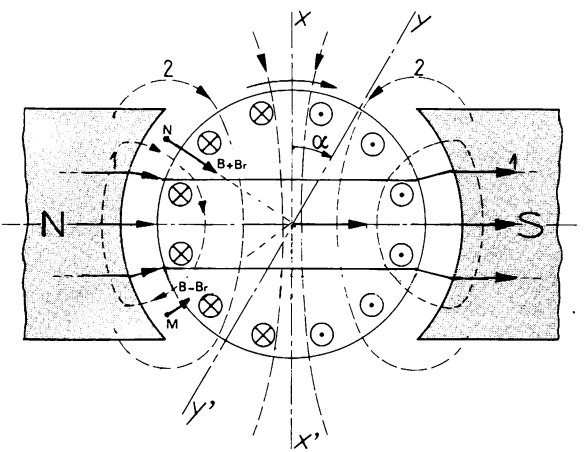


FIG. 11.

La réaction d'induit diminue l'induction à l'entrée d'un pôle et l'augmente à la sortie :

- l'augmentation ne compense pas la diminution : le flux résultant est inférieur au flux inducteur Φ;
- la tension induite et par suite la tension entre deux lames consécutives du collecteur sont plus grandes à la sortie d'un pôle, ce qui augmente le risque de *flash*, court-circuit entre balais provoqué aux fortes intensités par l'extension des étincelles au collecteur.

2. — LA LIGNE NEUTRE EST DÉCALÉE DANS LE SENS DE LA ROTATION

La direction du flux résultant est plus voisine des directions des grandes inductions que de celles des petites : la réaction d'induit fait tourner cette direction d'un angle α dans le sens de la rotation. Il en est donc de même de la ligne neutre réelle YY' sur laquelle la f. é. m. des brins actifs est nulle : les balais doivent être placés sur YY' pour que la f. é. m. de la machine soit maximale.

C. — Commutation

1. — DÉFINITION

On appelle *commutation* le changement de sens du courant induit dans une section de l'induit : elle se produit au passage sous un balai des lames de collecteur reliées à cette section (fig. 12).

2. — MÉCANISME DE LA COMMUTATION

Une spire ou une section est reliée à deux lames successives du collecteur.
Ainsi, dans la section reliée aux lames **a** et **b**, le courant circule dans un sens avant son passage sous un balai (fig. 12 *a*), puis en sens opposé immédiatement après, c'est-à-dire lorsque la lame **b** a remplacé la lame **a** sous le même balai (fig. 12 *c*).

Mieux encore, pendant un court instant (fig. 12 *b*), la section se trouve court-circuitée par le balai qui touche deux lames consécutives du collecteur, et le courant se renverse dans la section.

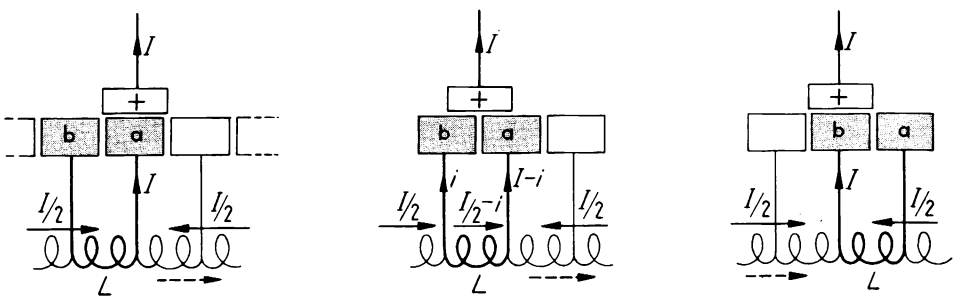


FIG. 12. — **Commutation.**

La section *L* est reliée aux lames *a* et *b* et se déplace suivant le sens de la flèche en pointillé.

a) *A gauche.* Avant passage de la section *L* sous un balai :

Le courant *I*, provenant des courants *I*/2 des sections reliées à *a*, gagne le circuit extérieur par cette lame.

b) *Au milieu.* La section est en court-circuit par le balai.

Le balai porte à la fois sur les lames *a* et *b* ; le courant augmente dans la lame *b*, diminue dans *a*, et dans la section *L*, passe de *I*/2 dans un sens à *I*/2 en sens inverse. Il en résulte une f. é. m. d'auto-induction qui tend à s'opposer à l'inversion du courant.

c) *A droite.* Après passage de la section *L* sous le balai : la lame *b* remplace la lame *a* sous le balai ; le courant *I*, provenant des courants *I*/2 des sections voisines, gagne le circuit extérieur par la lame *b* ; le courant s'est inversé dans la section *L* ; la variation rapide du courant de $\frac{I}{2}$ dans un sens à $\frac{I}{2}$ dans le sens inverse provoque un effet d'auto-induction ; cet effet tend à maintenir le courant dans son sens initial, d'où une étincelle qui prolonge le courant au moment où la lame *a* quitte le balai.

REMARQUE. — Pour simplifier l'explication, nous avons considéré un balai portant sur deux lames de collecteur; en réalité, un balai couvre 3 à 4 lames, parfois davantage, afin de diminuer les étincelles, petits arcs qui détériorent le collecteur.

3. — AMÉLIORATION DE LA COMMUTATION

a) Emploi de balais en charbon.

La chute de tension au contact charbon-collecteur augmente avec la densité de courant, d'où des chutes inégales aux lames *a* et *b* (fig. 12); la différence des deux chutes est de sens tel qu'elle facilite le renversement du courant. Les balais métalliques ne possèdent pas cette propriété. On utilise le charbon sous sa forme la plus lubrifiante, le graphite.

b) Décalage des balais.

La commutation s'améliore lorsque les balais sont décalés dans le sens du mouvement, par rapport à la ligne neutre théorique.

En effet, la spire, commutée n'est plus dans la zone de f. é. m. induite nulle ; il s'y produit une f. é. m. dont le sens est celui des courants après commutation et qui s'oppose donc à la f. é. m. d'auto-induction ; la commutation est améliorée.

Ce procédé a l'inconvénient de nécessiter un positionnement des balais en fonction de la charge et ne peut être retenu que pour les machines de petite puissance. Aussi lui préfère-t-on la solution suivante.

c) Pôles auxiliaires.

Les pôles auxiliaires — encore appelés *pôles de commutation* — sont constitués de noyaux de faible largeur, placés sur la ligne neutre théorique ; leurs enroulements reçoivent le courant total de l'induit (fig. 13) et le courant y circule dans un sens tel que le pôle est de même nom que le pôle principal qui le suit ; ces pôles auxiliaires engendrent un flux et par suite, dans les spires en commutation, une force électromotrice de renversement croissant avec l'intensité débitée, les balais restant calés sur la ligne neutre théorique.

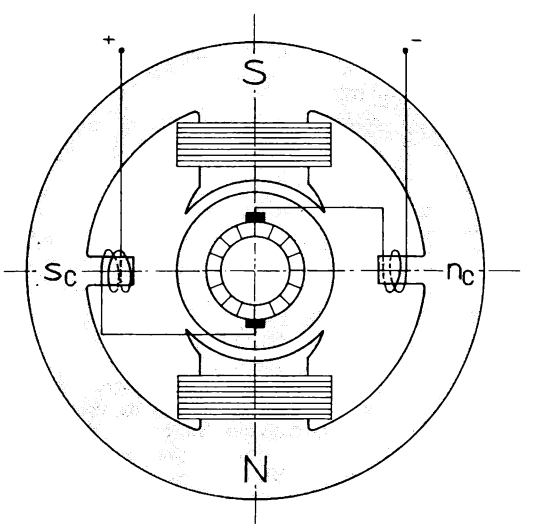


FIG. 13. — Pôles inducteurs principaux N et S ; pôles auxiliaires ou de commutation n_c et s_c.

La correction produite par les pôles de commutation est fonction du courant, comme l'effet à corriger, de sorte que cette correction est adaptée à toute valeur de la charge ; en outre, si le sens de rotation de la machine est changé, le positionnement des pôles auxiliaires reste valable.

Les machines à courant continu modernes possèdent toutes des pôles auxiliaires (fig. 14).

REMARQUE. — Profitons de la figure 14 pour observer l'*enroulement de compensation*, formé de barres logées dans les pôles principaux, au voisinage de l'entrefer. Cet enroulement est parcouru par le courant d'induit, en sens inverse, sous chaque pôle, du courant dans les faisceaux de l'induit : la réaction d'induit est annulée. Seules les machines de forte puissance possèdent un enroulement de compensation.

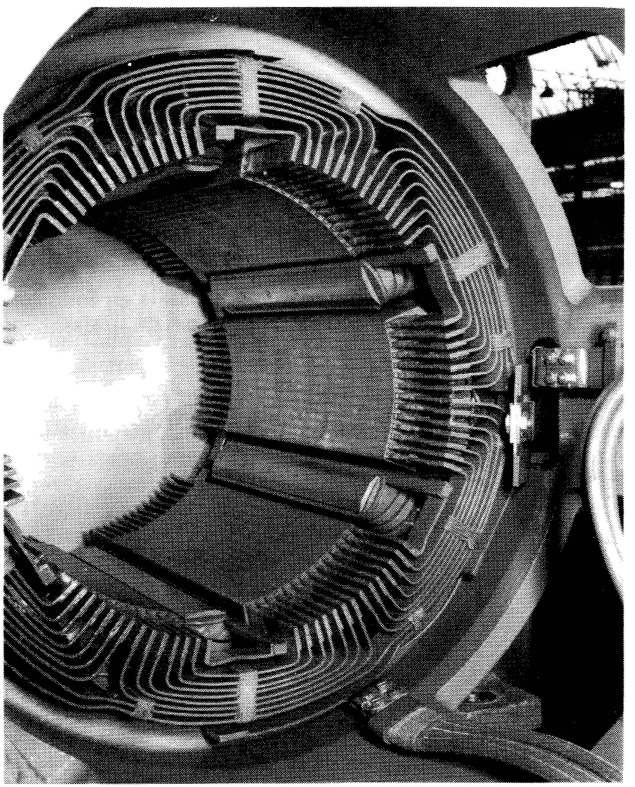


FIG. 14. — Génératrice de forte puissance 670 kW, 550 V, 980 tr/mn : vue du stator (inducteur) avec enroulement de compensation ; remarquez les pôles auxiliaires entre les pôles principaux et l'existence de barres au lieu de fils, en raison du courant très important (centaines d'ampères).

(*Document UNELEC.*)

D. — Exercice résolu

La force électromotrice d'une génératrice à excitation séparée est $E = 236$ *volts lorsque son courant inducteur est* $i = 0{,}7$ *ampère ; mesurées à chaud, la résistance de l'induit est* $r = 1{,}2$ *ohm et celle de l'inducteur* $R = 190$ *ohms. On admet que les pertes constantes, indépendantes de la charge, comprenant les pertes mécaniques (frottements...) et les pertes magnétiques (hystérésis, courants de Foucault) sont* $p = 100$ *watts, et que la réaction d'induit est négligeable.*

Lorsque la génératrice débite un courant $I = 13{,}5$ *ampères, calculer :*

1° *La tension* U *aux bornes de l'induit.*

2° *Le bilan des puissances.*

3° *Le rendement de la génératrice.*

Solution.

1° La loi des générateurs donne :

$$U = E - rI = 236 - 1{,}2 \,.\, 13{,}5 = 220 \text{ V}.$$

2° Les puissances en jeu se décomposent de la manière suivante :

Puissance utile fournie par la génératrice	: $P_u = UI = 220 \,.\, 13{,}5$	$= 2\,970$	W
Puissance perdue dans l'induit	: $p_1 = rI^2 = 1{,}2 \times 13{,}5^2$	≈ 219	W
Puissance perdue dans l'inducteur	: $p_2 = Ri^2 = 190 \times 0{,}7^2$	$= 93$	W
Pertes constantes	: p =	$= 100$	W
Puissance totale absorbée	: $P_a = P_u + p_1 + p_2 + p$	$= 3\,382$	W

3° Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{2\,970}{3\,382} \approx 0{,}87 \quad \text{ou} \quad 87\ \%.$$

PROBLÈMES DE LA LEÇON XI

1. Une génératrice à excitation indépendante constante a pour force électromotrice $E = 236$ volts. A pleine charge, elle fournit, sous une tension $U = 220$ volts, une puissance utile $P_u = 3$ kilowatts et les pertes dans l'induit sont 6 % de la puissance utile.

Calculer :

1° La chute de tension totale u dans l'induit.

2° La chute ohmique u' dans la résistance d'induit.

3° La réaction magnétique dans d'induit e.

Réponses : 1° $u = 16$ V; $u' = 13{,}3$ V; $e = 2{,}7$ V.

2. Le relevé de la caractéristique à vide d'une génératrice à courant continu à excitation indépendante effectué à 2 000 tours par minute a donné les résultats suivants :

f. é. m. E (V)	50	100	125	141	150	157	165
Excitation i (A)	0,15	0,3	0,45	0,8	1	1,15	1,5

La courbe de chute de tension totale à 2 000 tours par minute, pour un courant d'excitation de 1 ampère, peut être tracée à l'aide des valeurs ci-dessous :

Courant débité par l'induit I (A)	0	10	20	30	40	50	60
Chute de tension totale U_t (V)	0	5	10	16	24	36	50

Cette génératrice à excitation indépendante alimente un circuit d'éclairage de résistance R variable et une batterie d'accumulateurs de f. é. m. constante 120 volts, de résistance interne 1 ohm monté en batterie tampon (figure ci-contre). La vitesse de la génératrice est maintenue à 2 000 tours par minute et l'intensité du courant dans l'inducteur alimenté par une source indépendante est 1 ampère.

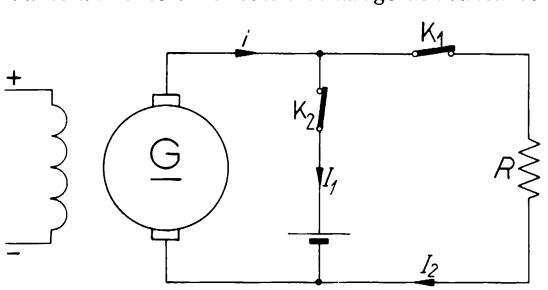


FIG. Pb 2.

1° L'interrupteur K_1 étant ouvert et l'interrupteur K_2 étant fermé, quelle est l'intensité I du courant débité par la génératrice ?

2° On ferme les interrupteurs K_1 et K_2 : on constate que l'intensité I_1 du courant dans la branche contenant la batterie est nulle pour une certaine valeur de R que l'on demande de déterminer.

3° On ferme K_1 et K_2 ; en respectant les sens arbitraires des courants choisis sur la figure (sens positif représenté par des flèches), déterminer :

a) La relation liant la différence de potentiel U aux bornes de G, l'intensité I du courant qu'elle débite et la résistance R.

b) Déterminer U, I_1, I_2 (intensité du courant dans R) pour $R = 2$ ohms, puis pour $R = 3$ ohms.

4° On ouvre K_2 et on ferme K_1 en donnant à R les valeurs 2 ohms et 3 ohms. Déterminer, dans chacun de ces cas, la tension aux bornes de R.

(Extrait B. T. S. Electrotechnique ; 1964.)

Réponses : 1° $I = 20$ A. 2° $R = 2{,}66\ \Omega$.

3° a) $U\left(1 + \frac{1}{R}\right) = I + 120$;

b) Pour $R = 2\ \Omega$: $U = 113{,}6$ V ; $I_2 = 56{,}8$ A et $I_1 = 6{,}4$ A : la batterie débite. Pour $R = 3\ \Omega$: $U = 123$ V ; $I_2 = 41$ A ; $I_1 = 3$ A : la batterie est réceptrice.

4° $R = 2\ \Omega$: $U = 108$ V ; $R = 3\ \Omega$: $U = 124$ V.

3. On propose l'étude d'une génératrice à courant continu avec « excitation séparée ».

— L'inducteur comporte huit pôles ; on considérera que le vecteur induction a un module constant sous chaque pôle, de valeur $B_0 = 1{,}4$ tesla, que son module est nul en dehors des pôles.
La section utile (1) d'un pôle est 48 centimètres-carrés. Le coefficient d'Hopkinson est égal à 1,12.

— L'induit porte 40 encoches ; chacune d'elles porte 60 conducteurs dont la longueur totale, pour chacun d'eux, est en moyenne de 75 centimètres. L'enroulement induit, ondulé série, comporte deux « voies d'enroulement » ; il est réalisé en fil de cuivre de diamètre 3,5 millimètres.

1° La vitesse de rotation de la machine étant de 1 500 tours par minute, calculer la force électromotrice à vide de cette génératrice.

2° La génératrice débite maintenant un courant tel que la densité de courant dans les conducteurs est de : 4,16 ampères par millimètre-carré. La température de l'enroulement induit est de 50 °C. On donne pour le cuivre, la résistivité à 20 °C : $1{,}73.10^{-8}$ ohm-mètre et son coefficient de température : $a = 4.10^{-3}$.

a) Calculer la résistance de l'enroulement induit.

b) Calculer l'intensité débitée *par la génératrice.*

c) En négligeant la réaction magnétique d'induit, calculer la différence de potentiel aux bornes de la génératrice en charge.

d) Calculer la puissance fournie par la génératrice ainsi chargée.

(Bac. de Technicien F 3 ; 1973.)

Réponses : 1° 1440 V ; 2° a) 0,90 Ω ; b) 80 A ; c) 1370 V ; d) 109 kW.

---

(1) NOTE DE L'AUTEUR : Cette section utile permet le calcul du flux total Φ_t d'un pôle. On a $\Phi_t = \Phi_u + \Phi_f$; Φ_u : flux utile c'est-à-dire agissant sur l'induit ; Φ_f : flux de fuite. On appelle *coefficient d'Hopkinson* le rapport du flux total au flux utile : $\nu = \frac{\Phi_t}{\Phi_u}$.

XII. — GÉNÉRATRICES AUTO-EXCITÉES

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— 1 génératrice $P = 3$ kW ; $U_n = 220$ V ; $I_n = 13{,}6$ A ; 1 500 tr/mn.
— 1 génératrice $P = 5{,}5$ kW ; $U_n = 110$ V ; $I_n = 58$ A ; 1 500 tr/mn ;
— 1 moteur d'entraînement à vitesse variable ;
— 2 rhéostats : 62 Ω ; 3,5 A ;
— tableaux de charge et tachymètre.

A. — Différents types

Lorsque l'induit d'une génératrice fournit le courant d'excitation, cette génératrice est dite *auto-excitée* ; on supprime ainsi la source auxiliaire d'excitation.

C'est le cas :

— de la génératrice à excitation en dérivation (fig. 1 *a* et *b*) ;

— de la génératrice à excitation composée (fig. 2).

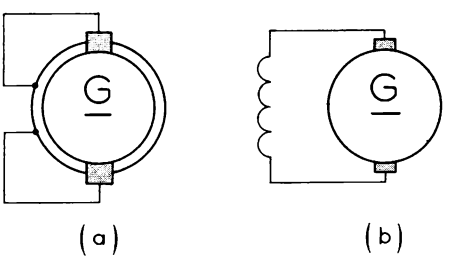


FIG. 1. — Génératrice à excitation en dérivation : symboles.

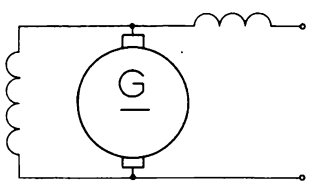


FIG. 2. — Génératrice à excitation composée.

La génératrice à excitation en série a été abandonnée, car elle ne s'amorce pas à vide (pas d'excitation). Nous bornerons donc notre étude aux deux autres types.

B. — Génératrice excitée en dérivation

I — PRINCIPE

a) L'inducteur est en dérivation aux bornes de l'induit.

L'enroulement fil fin servant d'inducteur est alimenté sous la même tension U que le circuit de charge : la génératrice est dite excitée *en dérivation* ou *en parallèle* (1).

(1) On dit aussi *génératrice « shunt. »*

Appelons I le courant fourni au circuit de charge, i le courant d'excitation : l'induit fournit le courant $I + i$; notons que l'inducteur est de forte résistance et que le courant d'excitation ne représente ainsi qu'une faible partie, de l'ordre de 2 à 5 %, du courant total.

b) L'aimantation rémanente de l'inducteur permet l'amorçage de la génératrice.

— *F. é. m. induite par le flux rémanent de la machine.*

Les circuits de charge et d'excitation étant déconnectés (fig. 3), entraînons l'induit à vitesse normale, de 1 500 tr/mn par exemple ; un voltmètre sensible disposé aux bornes de l'induit marque environ 2 volts : cette force électromotrice provient du déplacement des spires de l'induit dans le *flux rémanent* du circuit magnétique, dû à la faible aimantation qui subsiste dans le circuit magnétique après l'arrêt de la machine.

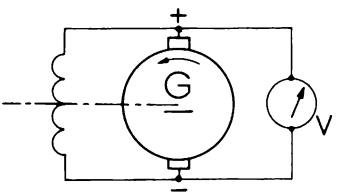


FIG. 3. — La rotation de 'induit dans le flux rémanent produit une faible f. é. m. induite : le voltmètre dévie.

— *Amorcage.*

Fermons le circuit d'excitation, la f. é. m. due à l'aimantation rémanente crée un faible courant d'excitation dans l'inducteur relié aux bornes de l'induit :

— Si le sens des connexions induit-inducteur (fig. 4 *a*) est tel que le courant d'excitation produit une induction renforçant le flux rémanent, la f. é. m. induite croît en même temps que le courant d'excitation et la génératrice s'amorce. En agissant sur un *rhéostat d'excitation* en série avec l'inducteur, on règle la f. é. m. à sa valeur nominale.

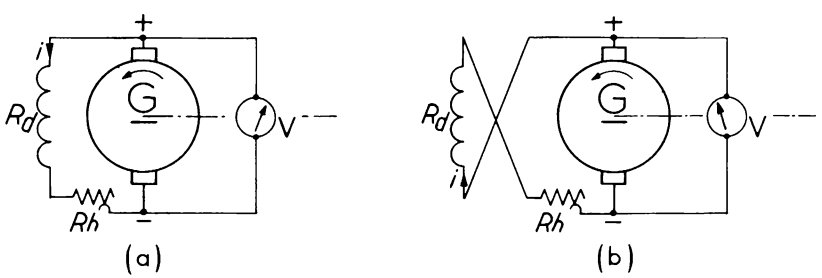


FIG. 4. — Pour un sens donné de rotation, la génératrice s'amorce, ou non, suivant le sens des connexions induit-inducteur ; *Rh* est le rhéostat d'excitation.

— Si le sens des connexions induit-inducteur (fig. 4 *b*) est tel que le courant d'excitation produit une induction diminuant le flux rémanent, la génératrice ne s'amorce pas (le voltmètre indique alors une tension plus faible qu'à circuit d'excitation *ouvert*).

Conclusion.

Pour un sens de rotation donné de l'induit, la génératrice ne s'amorce que pour un seul sens des connexions entre induit et inducteur : celui qui produit un flux de même sens que le flux rémanent.

2. — CARACTÉRISTIQUE A VIDE $E = f(i)$

a) Définition.

C'est la courbe de la f. é. m. E *aux bornes de l'induit en fonction du courant* i *d'excitation, à vitesse de rotation* n *constante.*

Elle se relève comme pour une génératrice à excitation séparée, l'allure de la courbe étant indépendante du mode d'excitation ; elle représente la *courbe de magnétisme* du circuit magnétique de la génératrice.

Nous avons relevé cette caractéristique — (XI, fig. 3) — pour la génératrice : $P = 3$ kW ; $U_n = 220$ V ; $I_n = 13{,}6$ A ; $n = 1\,500$ tr/mn.

b) Relation entre la f. é. m. E et le courant d'excitation i.

A vide, seul le courant d'excitation i parcourt le circuit induit-inducteur. L'induit se comporte comme un générateur de f. é. m. E, de résistance r, débitant le courant i dans la résistance R_d de l'inducteur.

On a : $U = E - ri$ (loi d'Ohm du générateur) ;
$U = (R_d + R_h)\, i$

En pratique, r et i sont petits et ri négligeable devant E, donc

$$\boxed{E \approx (R_d + R_h)\, i}$$

Elle montre que la résistance du circuit inducteur intervient dans l'amorçage.

c) Point de fonctionnement à vide.

E et i vérifient simultanément deux relations :

$$E = f(i) \quad (1) \quad ; \quad E = (R_d + R_h)\, i \quad (2).$$

Les coordonnées du *point de fonctionnement* à vide A sont donc la solution du système d'équations (1) et (2).

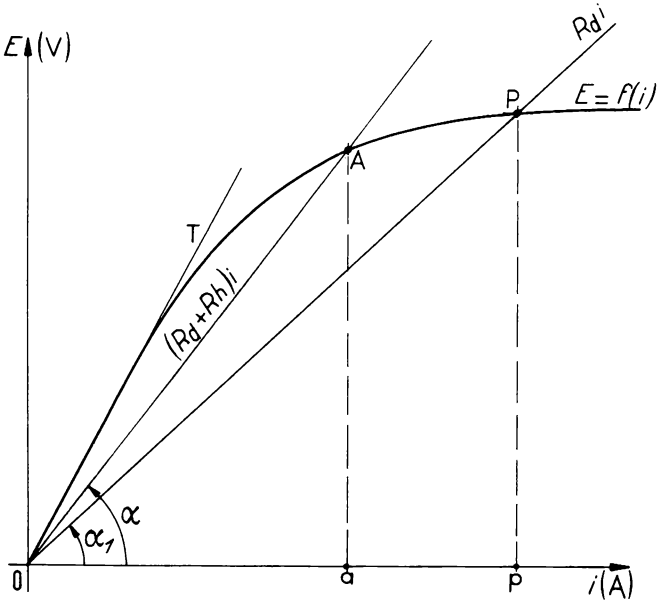


Fig. 5.

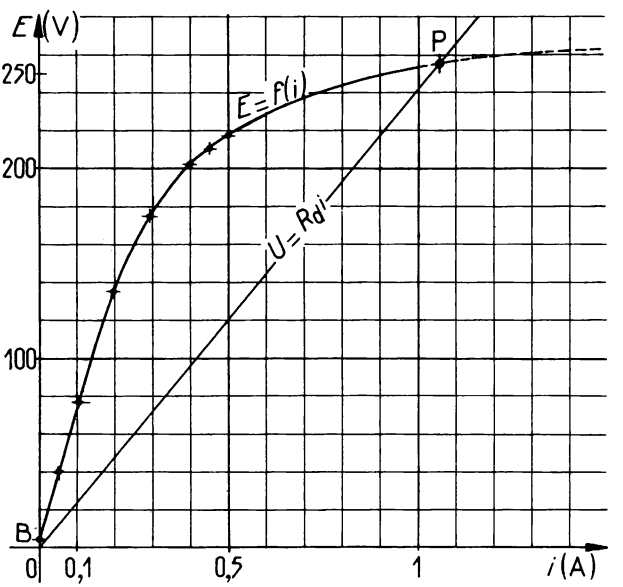


Fig. 6. — Détermination graphique du point de fonctionnement à vide P.

Comme la fonction f est donnée par une courbe, on résout graphiquement (fig. 5) ce système de 2 équations à 2 inconnues :

La droite représentant $E = (R_d + R_h)\, i$, appelée *droite des inducteurs*, coupe la caractéristique à vide $E = f(i)$ au point A cherché.

d) Résistance critique d'amorçage.

La résistance R_d est représentée sur la figure par le rapport $\frac{Pp}{Op}$, compte tenu des échelles, qui est la tangente de l'angle α_1.

Si la résistance du circuit inducteur croît, par intervention du rhéostat d'excitation, le point de fonctionnement se déplace ; à la limite, la droite des inducteurs tend vers la tangente OT, qui détermine la *résistance* R_c du circuit inducteur au-dessus de laquelle la génératrice ne peut s'amorcer (*résistance critique* d'amorçage) :

$$(R_{h\,max} = R_c - R_d)$$

Pour un fonctionnement stable, A doit se trouver dans la zone suivant immédiatement le coude de la caractéristique à vide.

e) Exemple de mesure.

Pour la génératrice précédente — (XI, § A 1 *b*) — nous avons obtenu :

— Résistance de l'inducteur (à chaud) : $R_d = 240$ ohms ;

— Coordonnées du point de fonctionnement P : $i = 1{,}05$ A ; E = 255 V. (fig. 6).

Pour la détermination de la résistance critique, on confond pratiquement B et O et se ramène à la figure 5.

Pour $i = 0{,}5$ A, l'ordonnée de la tangente OT est sensiblement 330 volts ; il en résulte que $R_c = \frac{330}{0{,}5} = 660$ ohms ; l'inducteur ayant une résistance $R_d = 240$ ohms, celle du rhéostat d'excitation ne devra pas dépasser $R_{h\,max} = 660 - 240 = 420$ ohms.

3. — CARACTÉRISTIQUE A VIDE $E = f(n)$ DE LA GÉNÉRATRICE DÉRIVATION

C'est la courbe de la f. é. m. E *en fonction de la vitesse de rotation* n, *le circuit inducteur étant connecté aux bornes de l'induit et sa résistance restant constante.*

a) Tracé de la courbe.

Nous entraînons la génératrice par un moteur à courant continu à vitesse variable (réglée par un dispositif électronique).

On relève, par exemple, dix valeurs de la f. é. m. correspondant à dix valeurs de la vitesse n entre 400 et 1 400 tr/mn (de 100 tr/mn en 100 tr/mn), après avoir vérifié l'amorçage correct de la génératrice.

Pour la génératrice utilisée (XI, § 2 *b*), nous avons obtenu :

n (tr/mn)	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400
E (V)	3,3	5,4	18	33	53	69	83	95	110	122	135

La courbe $E = f(n)$ est celle de la figure 7.

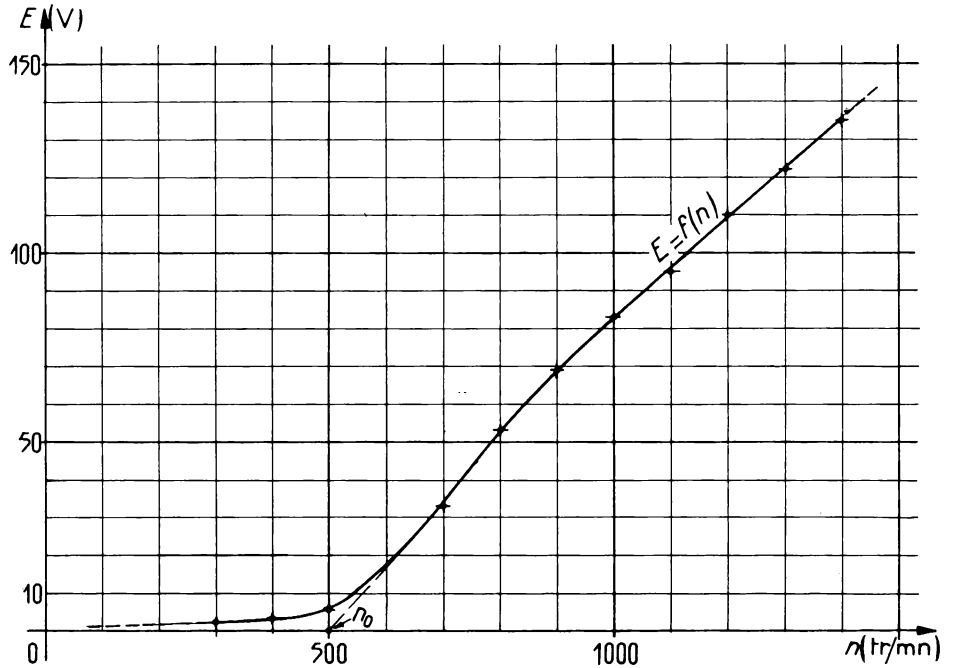


FIG. 7. — Caractéristique E = $f(n)$.

b) Interprétation physique.

— A faible vitesse, la f. é. m. croît lentement, proportionnellement à la vitesse de rotation tant que la génératrice n'est pas amorcée.

— A partir de la vitesse n_0, la f. é. m. croît très rapidement ; n_0 est la *vitesse critique* d'amorçage et la génératrice est alors amorcée.

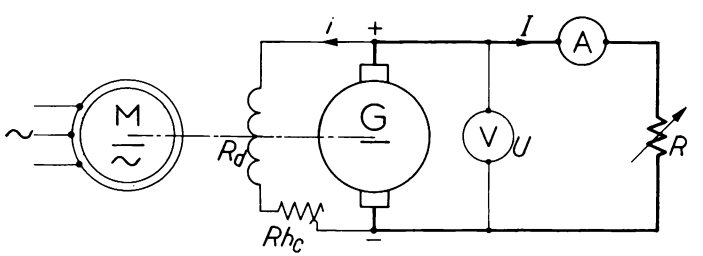


FIG. 8. — Schéma de détail pour le relevé de la caractéristique en charge $U = f(I)$.

4. — CARACTÉRISTIQUE EN CHARGE $U = f(I)$

a) Définition.

C'est la courbe représentant les variations de la tension U *aux bornes de la génératrice en fonction du courant débité* I, *à vitesse* n *constante et résistance du circuit d'excitation* $R_d + R_h$ *constante.*

b) Principe.

La génératrice est entraînée à vitesse constante par un moteur auxiliaire ; un rhéostat d'excitation est placé en série dans le circuit inducteur (fig. 8) ; on vérifie l'amorçage correct de la génératrice (1) et on règle la tension à vide à environ 10 % au-dessus de la valeur nominale.

Ce réglage étant effectué, on fait débiter la génératrice sur un banc de résistances.

On relève, pour différentes valeurs de I correspondant aux charges successives, les valeurs correspondantes de U. A chaque mesure, on vérifie que la vitesse est restée constante.

c) Exemple de mesures.

Génératrice utilisée : $P = 3$ kW ; $U_n = 220$ V ; $I_n = 13{,}6$ A ; $n = 1\,500$ tr/mn.

Nous avons relevé les valeurs suivantes :

$I_{(A)}$	0	2,5	5	7,5	10	13,5	14,5
$U_{(V)}$	240	236	234,6	227,5	220,5	208	204

Cette caractéristique en charge est celle de la figure 9 (p. 125) sous le repère 2.

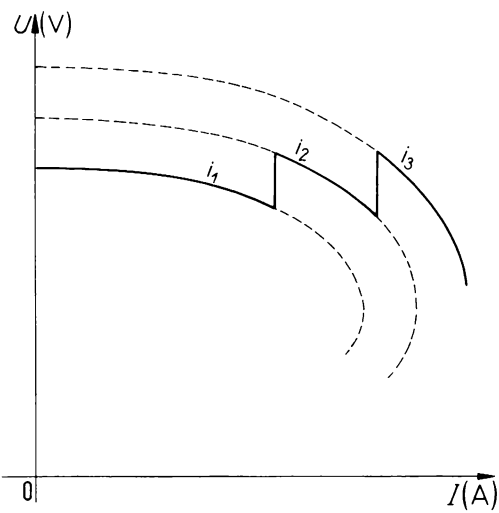


FIG. 9. — La variation de l'excitation modifie la caractéristique en charge ; i_1, i_2, i_3, valeurs croissantes données à l'excitation pour compenser la chute de tension.

d) Interprétation physique.

— La courbe montre que la chute $E - U$ est plus grande que pour une génératrice à excitation séparée, c'est-à-dire que U décroît plus vite quand le débit augmente.

Toutefois il est facile de pallier cette chute de tension en agissant sur le rhéostat d'excitation (fig. 9).

(1) Si le flux dans l'inducteur renforce le flux rémanent, la génératrice s'amorce : l'aiguille d'un voltmètre placé aux bornes de l'induit dévie ; si l'amorçage n'a pas lieu, il convient d'inverser, à la plaque à bornes, les connexions de l'inducteur.

— Au-delà d'un certain courant, la génératrice *refuse la charge;* si l'on diminue encore la résistance de charge, le courant décroît en même temps que la tension ; en effet, la chute de tension entraîne une diminution de l'excitation, et par suite de la force électromotrice.

— On peut atteindre la mise en court-circuit de la génératrice, ceci sans danger, puisque i est alors nul : le courant d'induit I_{cc} étant dû au seul flux rémanent, il est très inférieur au courant nominal.

e) Caractéristique de réglage $I = f(i)$ d'une génératrice dérivation.

C'est la courbe représentant les variations de l'intensité I *débitée par la génératrice en fonction du courant d'excitation* i, *à tension* U *constante et vitesse* n *constante.*

— Mode opératoire.

Pour tracer la caractéristique de la figure 10, nous avons utilisé une génératrice de puissance nominale $P_N = 5{,}5$ kW, d'intensité nominale $I_N = 58$ A, de vitesse nominale $n = 1\,500$ tr/mn. En raison du matériel disponible, la vitesse constante adoptée était 1 600 tr/mn et la tension constante aux bornes $U = 75$ V.

A vide ($I = 0$), on obtient U avec un courant d'excitation $i = 0{,}84$ A.

Avec une résistance de charge $R \approx 5\ \Omega$, on obtient $I = 15$ A et $U = 75$ V pour $i = 0{,}86$ A : i croît avec I.

— Mesures.

Pour $n = 1\,600$ tr/mn et $U = 75$ V.

I (A)	0	15	29	44	58	68
i (A)	0,84	0,86	0,87	0,90	0,96	0,99

D'où la caractéristique de réglage de la figure 10.

— Interprétation physique.

Nous avons vu p. 126 que

$$U = E - rI - e,$$

E : f. é. m.; rI : chute ohmique dans l'induit; e : réaction magnétique d'induit.

Or rI et e augmentent avec I et il en résulte une diminution de U : pour retrouver la valeur initiale de U, il faut augmenter E en augmentant le courant d'excitation i.

Notons que cette caractéristique de réglage est la même qu'en excitation séparée puisque le circuit d'excitation (inducteur et rhéostat) est alimenté sous tension constante.

— **Exercice.** *Calculer la résistance maximale utilisée pour le rhéostat d'excitation, connaissant la résistance de l'enroulement inducteur :* $R_d = 77\ \Omega$.

Solution.

Appliquons la loi d'Ohm au circuit d'excitation :

$$U = (R_d = R_h)i$$

D'où

$$R_h = \frac{U}{i} - R_d$$

On voit que R_h est maximale lorsque i est minimal (0,84 A) :

$$R_h = \frac{75}{0{,}84} - 77 = 12{,}3\ \Omega$$

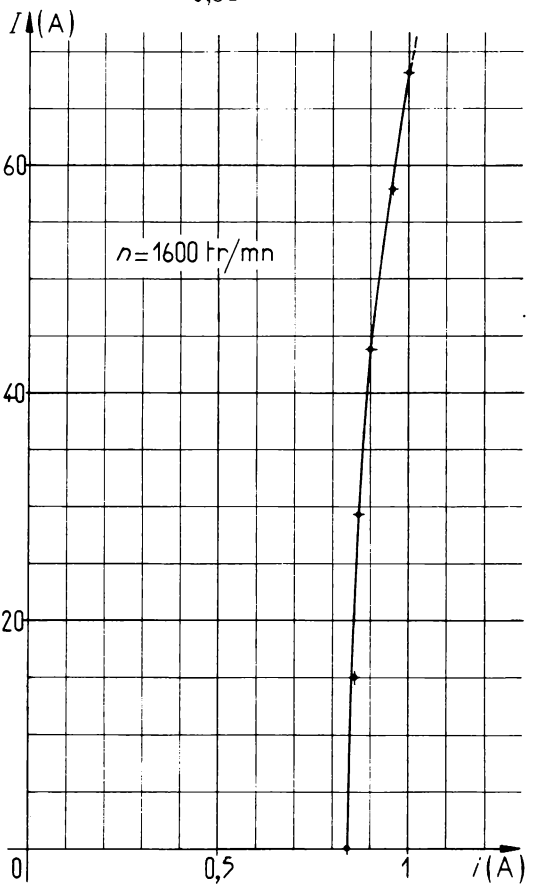


Fig. 10. — Exemple de caractéristique de réglage.

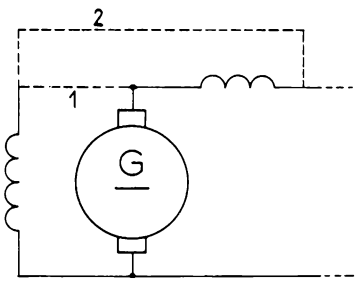
C. — Génératrice à excitation composée

1. — CONSTITUTION

a) **Une génératrice à excitation « composée » est à la fois « dérivation » et « série ».**

Une telle génératrice possède deux circuits d'excitation, l'un en dérivation aux bornes de l'induit, semblable à celui d'une génératrice dérivation, l'autre en série avec l'induit, semblable à celui d'une génératrice « série ».

— Lorsque l'enroulement dérivation est directement branché aux bornes de l'induit, la génératrice est dite en « *courte dérivation* » (fig. 11).



— Lorsque l'enroulement dérivation est branché aux bornes de l'ensemble induit-inducteur série, la génératrice est dite en « *longue dérivation* » (fig. 11).

FIG. 11.
Génératrice à excitation composée : courte dérivation (1).
Génératrice à excitation composée : longue dérivation (2) ; l'inducteur fil fin est en parallèle sur l'induit et l'enroulement « série ».

b) **Génératrice à flux additifs** (1).

C'est le branchement dans lequel le flux de l'inducteur série s'ajoute au flux de l'inducteur dérivation.

Or, le flux série croît avec le courant débité I, s'opposant ainsi à la chute de tension. Le nombre de spires de l'inducteur série peut être choisi de telle sorte que la tension U reste pratiquement constante.

Au-dessous de ce nombre, la génératrice est *hypocompound*; au-dessus, *hypercompound:* la tension augmente avec le débit.

c) **Génératrice à flux soustractifs** (1).

Une génératrice étant montée en flux additifs, permutons les connexions de l'inducteur série : on constate que la tension aux bornes de l'induit décroît très rapidement lorsque le débit I augmente.

La génératrice est à *flux soustractifs*, le flux de l'inducteur série étant de sens opposé au flux de l'inducteur dérivation.

2. — CARACTÉRISTIQUE EN CHARGE $U = f(I)$

La génératrice « compound » est entraînée par un moteur ; on l'amorce à vide comme une génératrice à excitation dérivation (§ B 4), puis on règle la tension à vide à sa valeur nominale à l'aide du rhéostat d'excitation (fig. 12). On relève la courbe représentant les variations de la tension U aux bornes de la génératrice, en fonction du courant I débité dans la charge, *la vitesse n* et la *résistance du circuit inducteur dérivation* étant maintenues constantes.

(1) La Norme donne : *excitation composée additive, excitation composée soustractive.*

Nous avons obtenu pour une génératrice de valeurs nominales : $P = 4{,}7$ kW ; $U_n = 125$ V ; $I_n = 37{,}6$ A ; $n = 1\,450$ tr/mn, l'excitation étant $i = 1{,}9$ ampère, les valeurs suivantes en diminuant progressivement la résistance de charge.

a) **A flux additifs.**

$I_{(A)}$	0	10	18	25	30	40
$U_{(V)}$	125	127,5	128,5	130	129	127

b) **A flux soustractifs.**

$I_{(A)}$	0	7	13	14	13	10	7	5,5	3,8
$U_{(V)}$	125	113	90	75	50	25	13	8	0

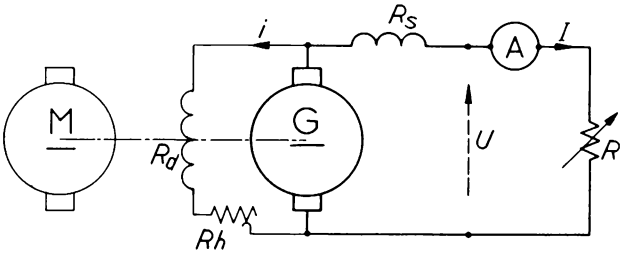


FIG. 12. — Montage en charge : la génératrice débite sur la résistance variable *R*.

La caractéristique en charge (fig. 13) montre que :

— pour la génératrice à flux additifs, la tension reste pratiquement constante pour des débits importants ;

— pour la génératrice à flux soustractifs, la tension a décru jusqu'à la mise en court-circuit de la génératrice, le courant passant par un maximum de 14 ampères.

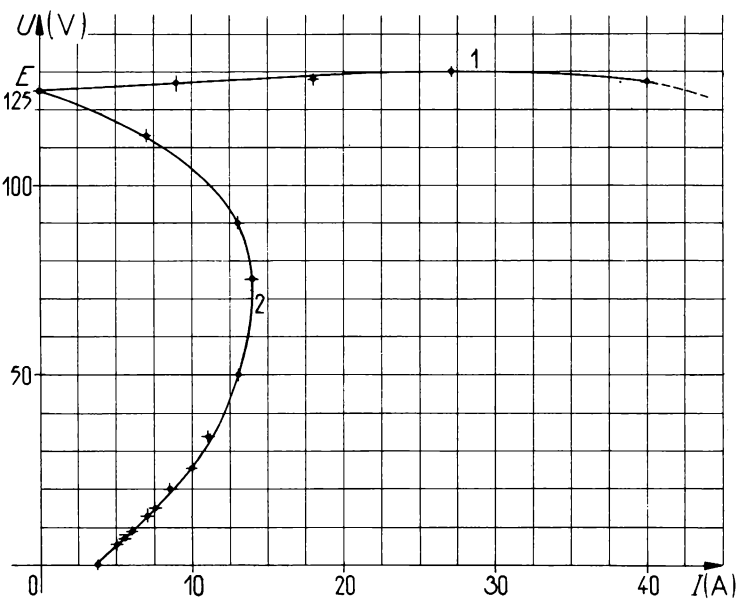


FIG. 13. — Caractéristique en charge $U = f(I)$:
(1) A flux additifs ;
(2) A flux soustractifs ; le courant de court-circuit est du uniquement au magnétisme rémanent.

Remarque 1.

En court-circuitant l'enroulement série de la génératrice à flux soustractifs, on revient au cas de la génératrice dérivation. Celle-ci donne lieu à un même type de courbe qu'une génératrice composée soustractive, mais il faut passer par une intensité maximale très supérieure à l'intensité nominale.

Remarque 2.

Pour s'assurer du montage à flux additifs ou soustractifs, on peut opérer de la manière suivante :

La génératrice étant amorcée, on la charge aux environs du quart de la charge nominale ; un voltmètre est disposé aux bornes de l'induit et on court-circuite l'*inducteur série :*

— si la déviation du voltmètre croît, la génératrice est à flux soustractifs ;

— si la déviation du voltmètre décroît, la génératrice est à flux additifs.

D. — Utilisation des génératrices usuelles

I. — COMPARAISON DES DIVERS TYPES DE GÉNÉRATRICES

a) La génératrice à excitation séparée à l'avantage d'une tension qui varie peu avec la charge.

Elle est utilisée :

— dans la sidérurgie, pour l'alimentation des groupes convertisseurs Ward-Léonard ;

— dans la traction électrique, pour l'alimentation des moteurs de traction des locomotives Diesel-électriques (série locomotive récente BB 67000) ;

— dans l'alimentation des servomécanismes.

La génératrice tachymétrique est une génératrice à aimant permanent donc à flux constant et force électromotrice E rigoureusement proportionnelle à la vitesse de rotation n ($E = knN\Phi$) ; un voltmètre placé à ses bornes peut être gradué en tours par minute et indiquer la vitesse du moteur d'entraînement.

b) La génératrice dérivation permet un réglage simple de la tension en charge.

On l'utilise pour la charge des accumulateurs, l'excitation des alternateurs et moteurs synchrones.

c) Les génératrices à excitation composée sont très employées :

— dans l'alimentation de certain réseau à courant continu (en flux additifs) ;

— dans la soudure à l'arc, les arcs de projecteurs (en flux soustractifs).

2. — AVANTAGE DES REDRESSEURS SUR LES GÉNÉRATEURS A COURANT CONTINU

Malgré les possibilités techniques des génératrices, l'utilisation des *redresseurs* (*à diode* au silicium) tend à se substituer peu à peu à celle des génératrices.

En effet, les redresseurs sont des dispositifs *statiques*, alimentés par le réseau alternatif et fournissant l'énergie sous forme de courant continu ; ils permettent :

— l'utilisation d'un seul réseau ;

— le fractionnement de la puissance ;

— l'alimentation des moteurs de traction électrique à partir du réseau alternatif.

Ils ne possèdent pas d'organes tournants, ce qui évite l'usure mécanique par frottements ; ils nécessitent moins d'entretien.

Enfin, les redresseurs à semiconducteurs à électrode de commande (thyristors) offrent l'avantage d'un réglage statique de la tension continue et se prêtent bien à l'automatisme.

E. — Exercice résolu

Une génératrice excitée en dérivation a un circuit inducteur de résistance R = *185 ohms et un induit de résistance* r = *0,85 ohm entre balais.*

Calculer, lorsque cette génératrice débite dans sa charge un courant I = *18,9 ampères sous une tension* U = *203,5 volts :*

1° *L'intensité des courants dans l'inducteur et dans l'induit.*

2° *La f. é. m.*

3° *La puissance totale fournie par l'induit.*

4° *Le rendement électrique de la génératrice.*

5° *La puissance du moteur d'entraînement si la génératrice a un rendement industriel* $\eta_i = 0{,}80$.

Solution.

1° Intensité du courant :

a) dans l'inducteur : $i = \dfrac{203{,}5}{185} = 1{,}1$ A.

b) dans l'induit : $I + i = 18{,}9 + 1{,}1 = 20$ A.

2° Force électromotrice :

$$E = U + r\,(I + i) = 203{,}5 + 0{,}85 \times 20 = 220{,}5 \text{ V.}$$

3° Puissance totale fournie sous forme électrique :

$$P_t = E\,(I + i) = 220{,}5 \times 20 = 4\,410 \text{ W.}$$

4° Rendement électrique :

C'est le quotient de la puissance fournie à la charge par la puissance électrique totale :

$$\eta_e = \frac{P_u}{P_t} = \frac{UI}{E\,(I + i)} = \frac{203{,}5 \times 18{,}9}{4\,410} = \frac{3\,846}{4\,410} \approx 0{,}87.$$

5° Puissance P_M du moteur d'entraînement :

On a : $$\eta_i = \frac{P_u}{P_M}$$

soit $$P_M = \frac{P_u}{\eta_i} = \frac{3\,846}{0{,}8} \approx 4\,807 \text{ W} \approx 4{,}8 \text{ kW}$$

PROBLÈMES DE LA LEÇON XII

1. Un atelier est alimenté par une génératrice shunt sous une tension continue $U = 220$ volts. L'installation comprend : la génératrice, la ligne bifilaire, un moteur d'une puissance utile $P_u = 2$ kilowatts (220 V) et de rendement $\eta = 0{,}8$, un four électrique de puissance 10 kilowatts (220 V) et 30 lampes à incandescence de 200 W (220 V). Le moteur, le four et les lampes sont branchés en dérivation sur la ligne.

1re partie.

On demande :

1° Effectuer le schéma de principe de cette installation.

2° Calculer :

a) L'intensité I_1 absorbée par le moteur en pleine charge.

b) L'intensité I_2 absorbée par le four.

c) L'intensité I_3 absorbée par les 30 lampes.

d) L'intensité totale dans la ligne quand l'installation fonctionne à pleine charge.

2e partie.

L'induit de la génératrice a une résistance $r = 0{,}25$ ohm ; son circuit inducteur une résistance $R_d = 105$ ohms. En admettant que la tension aux bornes de la génératrice soit $U_G = 220$ volts, on demande, pour un débit en ligne $I = 30$ ampères, de calculer :

a) L'intensité I_d du courant dans l'inducteur.

b) L'intensité du courant I_i dans l'induit.

c) La force électromotrice E de la génératrice.

3e partie.

Lorsque la génératrice fournit un courant $I = 90$ ampères en ligne sous 220 volts, son rendement est $\eta = 0{,}78$. Le rendement du moteur d'entraînement, accouplé en direct, est alors $\eta_M = 0{,}82$. Calculer :

a) La puissance utile P_u de la génératrice.

b) La puissance absorbée P_1.

c) La puissance absorbée P_2 par le moteur M d'entraînement.

d) Le rendement global η du groupe.

(B. E. I. Sciences ; 1960.)

Réponses :

1re partie : a) $I_1 = 11{,}4$ A ; b) $I_2 = 45{,}4$ A ; c) $I_3 = 27{,}3$ A ; d) $I \approx 84$ A.

2e partie : a) $I_d = 2{,}1$ A ; b) $I_i = 32$ A ; c) $E = 228$ V.

3e partie : a) $P_u = 19\,800$ W ; b) $P_1 = 25\,380$ W ; c) $P_2 = 30\,950$ W ; d) $\eta \approx 0{,}64$.

2. Une génératrice bipolaire excitée en dérivation comporte un induit ayant $N = 500$ conducteurs périphériques tournant à la vitesse $n = 1\,200$ tours par minute ; le flux produit par les inducteurs est 0,012 weber.

Calculer :

a) La force électromotrice E de la génératrice.

b) La tension U aux bornes de l'induit, sachant que sa résistance est $r = 0{,}8$ ohm et que le courant débité est $I = 15$ ampères.

c) Le courant i dans les inducteurs sachant que leur résistance est $R = 120$ ohms.

d) La puissance fournie P_u au circuit de charge.

e) Le rendement électrique η de la génératrice.

(C. A. P. Électrotechnique ; Paris, 1968.)

Réponses : a) $E = 120$ V ; b) $U = 108$ V ; c) $i = 0{,}9$ A ; d) $P_u = 1\,523$ W ; e) $\eta = 0{,}84$.

3. La courbe ci-dessous, obtenue expérimentalement, est la caractéristique en charge d'une génératrice série (220 V ; 15 A ; 1 500 tr/mn).

On admettra que cette courbe est la parabole d'axe parallèle à OU passant par l'origine des axes et les points A (2 ; 66), B (4 ; 120).

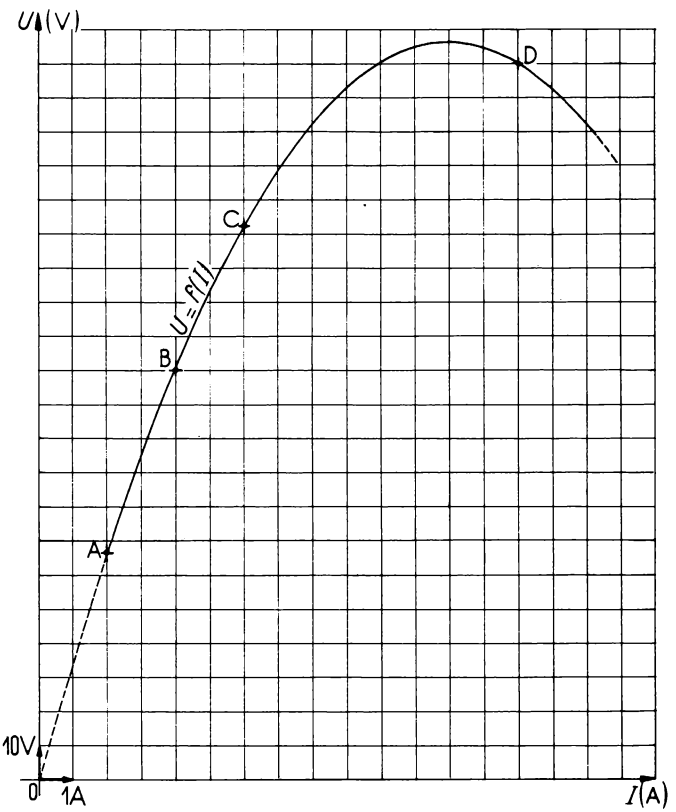


FIG. Pb 3.

1re partie (A) :

1° Déterminer l'équation de cette parabole.

2° S'assurer que les points C et D définis expérimentalement (voir courbe) vérifient cette équation.

2e partie (B) :

1° Qu'appelle-t-on point de fonctionnement d'une génératrice quand elle débite dans une résistance R ?

2° Déterminer graphiquement ce point pour $R = 16{,}5$ ohms.

3° Retrouver le résultat par le calcul.

3° partie (C) : page 181 (moteur série)

(B. E. P. Électrotechnique, 1969.)

Réponses :

A) 1° $U = -3/2\ I^2 + 36\ I$ **; 2° Pour C (6; 162); D (14; 210),** $U = f(I)$ **est vérifiée.**

B) 2° P **(13 A; 214,5 V).**

4. Dans une génératrice à excitation composée, en courte dérivation (fig. 11), on a : résistance totale du circuit d'excitation en dérivation : $R_d = 90\ \Omega$; résistance de l'enroulement série : $R_s = 0{,}60\ \Omega$; résistance de l'induit ,entre balais : $r = 0{,}20\ \Omega$; résistance de charge : $R = 9{,}4\ \Omega$. Sachant que la f. é. m. est $E = 230$ V, calculer :
1° Le courant I_t dans l'induit et la tension U_B entre balais.
2° Le courant débité I, le courant i dans R_d, la tension U aux bornes.
3° Le rendement de la machine.
4° On remplace l'enroulement d'excitation série par une résistance égale (0,60 Ω) : pour maintenir la même tension aux bornes, i doit passer à la valeur $i' = 2{,}8$ A. Sachant que l'enroulement d'excitation a $N_P = 3\,000$ spires, calculer le nombre de spires N_S de l'enroulement série.

Réponses : 1° 25 A; 225 V. 2° 22,5 A; 2,5 A; 211,5 V. 3° $\eta = 0{,}828 \approx 0{,}83$. **4°** $N_S = N_P \dfrac{i' - i}{I} = 40$.

XIII. — MOTEUR A COURANT CONTINU

RELATIONS GÉNÉRALES

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— 1 génératrice bipolaire ;
— 1 moteur multipolaire ;
— 1 batterie d'accumulateurs;
— 1 oscilloscope à deux voies
— 1 rhéostat ;
— 1 voltmètre ; 1 ampèremètre
— 1 interrupteur bipolaire.

A. — Réversibilité d'une génératrice

1. — EXPÉRIENCE (fig. 1)

Alimentons l'induit d'une génératrice montée en excitation séparée à partir d'une source de tension constante, par exemple une batterie d'accumulateurs (1), dont on peut régler le débit I à l'aide d'un rhéostat ; l'inducteur produit une induction $\vec{B}$. Éliminons progressivement le rhéostat : à partir d'une certaine position du curseur, l'induit se met à tourner ; la vitesse de rotation s'accroît si nous augmentons le courant d'alimentation I.

2. — INTERPRÉTATION PHYSIQUE (fig. 2)

L'induction $\vec{B}$ *dans l'entrefer* est normale au fer, c'est-à-dire au pôle inducteur et à l'induit ; cette propriété est due à la très grande valeur de la perméabilité du fer : dans l'entrefer, le champ est donc *radial*.

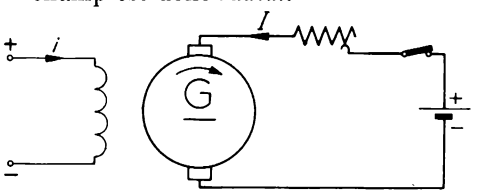


FIG. 1. — Génératrice à excitation séparée alimentée en moteur : réversibilité.

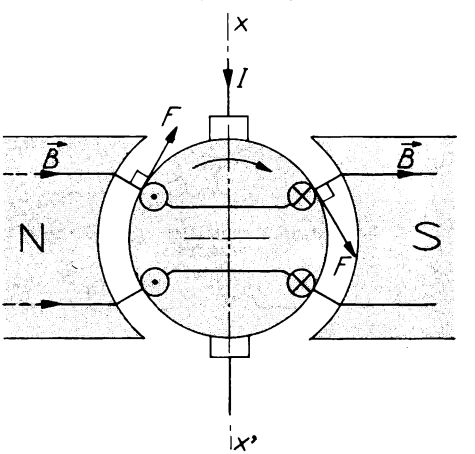


FIG. 2. — Dans l'*entrefer*, le champ est dirigé suivant les rayons de l'induit.

(1) Pour une alimentation sous tension normale, la source sera un redresseur alimenté par le réseau alternatif.

D'autre part, la force électromagnétique $F = Bil$ s'exerçant sur chaque conducteur parcouru par le courant i est tangente à l'induit et on sait que i s'inverse au passage sous la ligne neutre (rôle du collecteur, ch. X, § A2).

Dans ces conditions, le couple résultant obtenu par la somme des forces tangentielles F appliquées aux conducteurs de l'induit assure la rotation, et éventuellement l'entraînement d'une machine accouplée (charge mécanique).

En conclusion :

Une génératrice peut fonctionner en moteur : on dit que son fonctionnement est ***réversible.***

Remarque 1.

Ces forces électromagnétiques existent dans la marche en génératrice, mais elles constituent un ensemble de forces résistantes que doit vaincre le moteur d'entraînement, nécessitant de ce fait une consommation d'énergie mécanique.

Remarque 2.

Rappelons (V, § A) que la force électromagnétique F s'inverse avec i ou $\vec{B}$; le sens de rotation d'un moteur peut être inversé par deux procédés :

— soit en changeant le sens du flux inducteur, c'est-à-dire en inversant le courant inducteur ;

— soit en inversant le courant dans l'induit.

Pour un même sens des courants dans l'inducteur et l'induit, le sens de rotation dans la marche en moteur est l'inverse de celui de la marche en génératrice ; en effet, on obtient ainsi des couples de même sens, mais le couple est moteur (cas du moteur) ou résistant (cas de la génératrice).

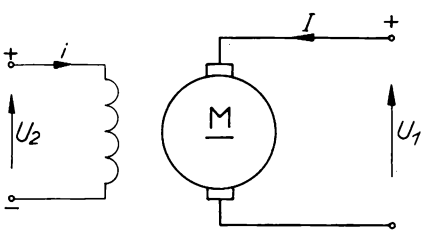


Fig. 3. — Moteur à excitation séparée : schéma de principe.

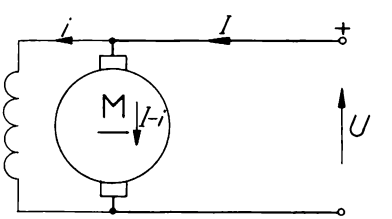


Fig. 4. — Moteur à excitation en dérivation : schéma de principe.

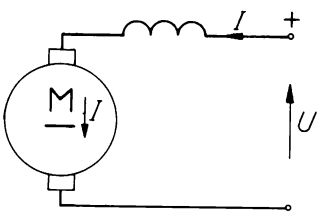


Fig. 5. — Moteur à excitation en série : schéma de principe.

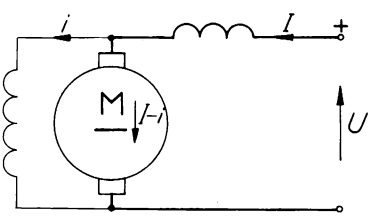


Fig. 6. — Moteur à excitation composée : schéma de principe.

3. — TYPES DE MOTEURS

On les classe, comme les génératrices, d'après leur mode d'excitation, dont dépendent leurs propriétés et leurs applications :

— Moteurs à excitation indépendante ou séparée (fig. 3).

— Moteurs à auto-excitation permettant de n'utiliser qu'une source :

- à excitation en dérivation (fig. 4) ;
- à excitation en série (fig. 5) ;
- à excitation composée (fig. 6).

B. — Force contre-électromotrice d'un moteur

I. — EXISTENCE D'UNE F. C. É. M.

a) **Mise en évidence expérimentale** (fig. 7).

Un moteur M est soumis à sa tension d'alimentation U lorsque l'interrupteur (K) est fermé ; le voltmètre dévie et marque U.

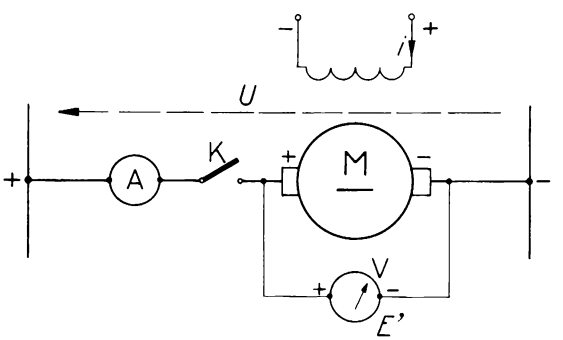


FIG. 7. — F. C. É. M. d'un moteur : mise en évidence expérimentale.

Ouvrons (K), le moteur continue de tourner pendant quelques secondes en ralentissant ; l'ampèremètre indique $I = 0$; seul le voltmètre dévie encore *dans le même sens*, mais sa déviation diminue au fur et à mesure du ralentissement.

Ceci montre qu'il existe, pendant la rotation du moteur, une force électromotrice due à la rotation des conducteurs actifs, qui coupent du flux de la même façon que dans une génératrice ; comme elle s'oppose à la tension d'alimentation, on l'appelle *force contre-électromotrice* et nous la noterons E'.

Elle est identique à la force électromotrice de la même machine fonctionnant en génératrice pour une même excitation i, et une même vitesse n ; son expression est donc (1) :

$$\boxed{E' = nN\Phi}$$

E' en volt.
n en tours par seconde.
Φ en weber.
N nombre de conducteurs.

b) **Observation d'une force contre-électromotrice à l'oscilloscope** (fig. 8).

On fait varier la vitesse de rotation d'un moteur en agissant sur l'excitation à l'aide d'une commande électronique (variateur de vitesse) alimentée par un pont redresseur :

— L'image du courant dans l'induit est donnée par la courbe du bas.

— L'image de la tension aux bornes de l'induit — courbe du haut — montre, entre les impulsions du courant d'alimentation, la force contre-électromotrice (f. c. é. m.) E' : elle est légèrement ondulée à cause du déplacement rapide des lames du collecteur sous les balais.

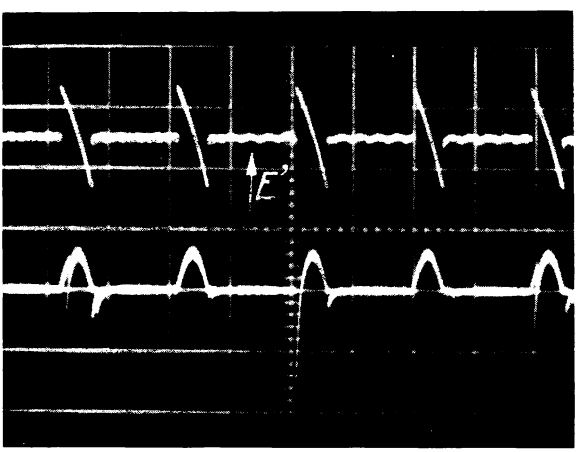


FIG. 8. — **Moteur à courant continu à réglage de vitesse :** observation de la force contre-électromotrice.
— *Oscillogramme du bas* : impulsions de courant dans l'induit. Le niveau zéro (courant nul) correspond aux segments horizontaux.
— *Oscillogramme du haut* : tension aux bornes de l'induit. Aux impulsions de courant correspondent des impulsions de la tension d'alimentation ; entre ces impulsions, l'induit n'est plus alimenté, ce qui permet d'observer la f. c. é. m. E' (niveau zéro : le trait horizontal gradué).

2. — TENSION AUX BORNES

La loi des récepteurs à f. c. é. m. s'applique aux moteurs ; on a donc :

$$\boxed{U = E' + rI}$$

U en volt.
E' en volt.
r en ohm.
I en ampère.

Cette expression ne concerne que l'induit : U est la tension à ses bornes, E' sa f. c. é. m., I le courant qui le traverse et r sa résistance interne entre balais.

(1) Expression valable pour le moteur bipolaire et le moteur multipolaire à enroulement imbriqué, pour lequel $p = q$ (voir p. 156).

C. — Puissance utile ; couple utile

I. — PUISSANCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

C'est la puissance *mécanique totale* P_t engendrée par les forces électromagnétiques. Nous avons vu (IV, § B) qu'un conducteur parcouru par un courant I et qui coupe le flux Φ produit un travail :

$$W = I\,\Phi.$$

Soit t la durée du déplacement ; la puissance obtenue est :

$$p = \frac{W}{t} = I\,\frac{\Phi}{t}.$$

Pour un conducteur actif d'un moteur bipolaire tournant à n tours par seconde, le flux Φ d'un pôle est coupé en un demi-tour, c'est-à-dire en un temps $t = \frac{1}{2n}$ seconde ; mais ce conducteur est parcouru par $\frac{I}{2}$, I étant le courant d'alimentation ; la puissance par conducteur est donc :

$$p = \frac{I}{2}\,\frac{\Phi}{t} = n\,\Phi\,I.$$

Avec N conducteurs actifs, on obtient la puissance mécanique totale $P_t = Np$ du moteur, appelée *puissance électromagnétique ;*

soit $\boxed{P_t = Nn\,\Phi\,I}$

Φ en weber.
I en ampère.
P_t en watt.
n en tours par seconde.
N nombre de conducteurs actifs.

Ou encore en tenant compte de la relation $E' = nN\Phi$, on a :

$$\boxed{P_t = E'I}$$

P_t en watt.
E' en volt.
I en ampère.

P_t est la somme de la puissance mécanique utile, des pertes mécaniques (frottements, ...) et des pertes dans le fer (hystérésis, courant de Foucault).

REMARQUE.

En appliquant la loi d'Ohm relative aux récepteurs à f. c. é. m. sous sa forme :

$$U = E' + rI$$

et en multipliant tous les termes de cette relation par I, on a :

$$UI = E'I + rI^2.$$

Cette égalité montre que, UI étant la puissance absorbée par l'induit et rI^2 les pertes par effet Joule, le terme $E'I$ exprime bien la puissance électrique transformée en puissance *mécanique totale* du moteur.

2. — PUISSANCE UTILE, COUPLE DISPONIBLE SUR L'ARBRE

a) Expérience.

On utilise une génératrice-balance (1) entraînée par un moteur et permettant la mesure expérimentale du couple recueilli sur l'arbre de la machine.

Pour un certain réglage et avec le moteur utilisé, nous avons relevé : l'intensité dans l'induit : $I = 8{,}2$ ampères, la tension à ses bornes : $U = 160$ volts, la vitesse de rotation : 1 420 tours par minute (soit $n \approx 24$ tours par seconde), ainsi que le couple utile sur l'arbre : $M = Fl = 7{,}1$ m.N (masses marquées $m = 1\,450$ grammes sur le plateau de la balance et $l = 0{,}50$ m).

Nous en avons déduit :

— F. c. é. m. : $E' = U - rI = 156$ V.

— Puissance utile : $P_u = M_u \omega = 1\,057 \approx 1060$ W.

— Puissance électromagnétique : $P_t = E'I = 1\,282 \approx 1280$ W.

b) Interprétation physique.

On constate que P_u est inférieure à P_t ; en effet, la différence entre la puissance mécanique totale P_t fournie par le moteur et la puissance mécanique P_u utilisable sur l'arbre résulte des pertes mécaniques (frottements, ventilation, etc.) et des pertes dues aux effets d'hystérésis, aux courants de Foucault. La somme de toutes ces pertes constitue les *pertes constantes* p_c, ainsi appelées parce qu'elles sont indépendantes de la charge :

$$\boxed{P_u = P_t - p_c.}$$

c) Couple moteur.

Le moment d'un couple s'exprime par la relation générale de la mécanique (2) :

$$M = \frac{P}{\omega} \qquad \text{ou} \qquad P = M\,\omega,$$

où $\omega = 2\pi n$ est la vitesse de rotation en radians par seconde (n en tr/s).
On distingue :

— Le couple mécanique total d'un moteur, ou couple électromagnétique :

$$M_t = \frac{P_t}{\omega} = \frac{E'I}{\omega}$$

ou encore

$$M_t = \frac{nN\,\Phi\,I}{2\,\pi\,n} = \frac{N\,\Phi\,I}{2\,\pi}$$

$$\boxed{M_t = \frac{N\,\Phi\,I}{2\,\pi}}$$

M_t en mètre-newton.
Φ en weber.
I en ampère.
N nombre de conducteurs.

(1) *Génératrice:* bras de levier $l = 0{,}50$ m.
Moteur: résistance de l'induit $r = 0{,}45\ \Omega$; résistance de l'inducteur $R = 220\ \Omega$; excitation séparée = 0,7 A. C'est le moteur de la page 122, utilisé au tiers de sa puissance nominale.
(2) Voir *fascicule I* (page 15).

— Le couple mécanique utile M_u correspondant à la puissance utile P_u :

$$M_u = \frac{P_u}{\omega} < M_t.$$

Dans les moteurs modernes, les pertes constantes p_c sont très inférieures à la puissance utile P_u ; nous nous placerons *parfois (pour les calculs ou les courbes)* dans l'approximation $P_u = P_t$, donc $M_u = M_t$, et pour simplifier nous représenterons ce couple par M.

3. — BILAN DES PUISSANCES

On a donc pour le bilan des puissances (fig. 9) :

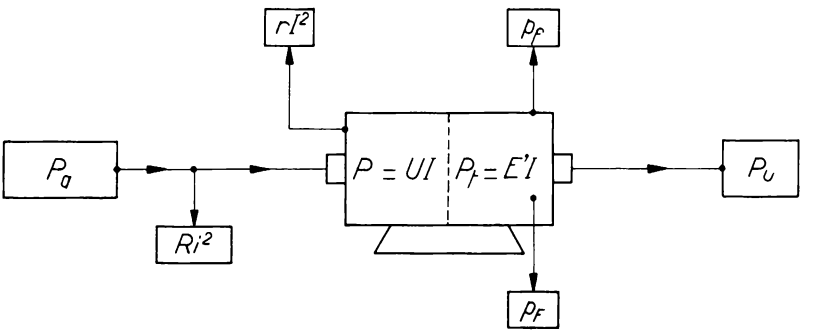


FIG. 9. — **Répartition des puissances dans un moteur.**

P_a : puissance totale absorbée par l'induit et l'inducteur ; Ri^2 : pertes par effet Joule dans l'inducteur ; rI^2 : pertes par effet Joule dans l'induit.

$P = UI$: puissance absorbée par l'induit ; $P = P_a - Ri^2$.

$P_t = E'I$: puissance électromagnétique du moteur ; $P_t = P - rI^2$.

p_f : pertes mécaniques (frottements, ventilation) ; p_F : pertes magnétiques dans le fer (courants de Foucault, hystérésis...) ; $p_f + p_F = p_c$.

P_u : puissance utile (disponible sur l'arbre pour entraîner la charge) ; $P_u = P_t - (p_f + p_F) = P_t - p_c$.

4. — EXEMPLE NUMÉRIQUE

Pour le moteur à excitation séparée de la page précédente, pour la charge $P_u = 1\,060$ W : $I = 8{,}2$ A ; $i = 0{,}70$ A ; $P_t = 1\,280$ W.

On en déduit les pertes :

— par effet Joule dans l'induit :

$$rI^2 = 0{,}45 \times 8{,}2^2 = 30 \text{ W};$$

— par effet Joule dans l'inducteur :

$$Ri^2 = 220 \times 0{,}7^2 = 108 \text{ W};$$

— pertes constantes (ou à vide) :

$$p_c = P_t - P_u = 1\,280 - 1\,060 = 220 \text{ W}.$$

La puissance absorbée est donc :

$$P_a = P_t + rI^2 + Ri^2 = 1\,418 \text{ W},$$

et le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{1\,060}{1\,418} = 0{,}75$$

(il s'élève à 0,85 à pleine charge).

D. — Moteurs multipolaires

On appelle *multipolaires* les moteurs à plus de deux pôles et on désigne par p le nombre de *paires de pôles.*

Par exemple : $2p = 4$, si le moteur est tétrapolaire.

Par analogie avec les génératrices, et puisque la structure d'un moteur est la même que celle d'une génératrice à $2p$ pôles et $2q$ voies d'enroulements, nous pouvons résumer les formules relatives aux moteurs multipolaires de la manière suivante.

— Loi d'Ohm : $E' = U - rI.$

— F. c. é. m. : $E' = \frac{p}{q} nN\Phi.$

— Vitesse $n = \frac{q}{p} \cdot \frac{U - rI}{N\Phi}.$

— Puissance électromagnétique ou puissance mécanique totale :

$$P_t = E'I = \frac{p}{q} nN\Phi I = 2\pi n M_t.$$

— Puissance mécanique utile : $P_u = P_t - p_c.$

— Couple moteur utile : $M_u = \frac{P_u}{2\pi n}.$

REMARQUES.

1° On constate que l'étude des moteurs à courant continu a pour base quatre relations dont **une seule** est particulière au moteur : $E' = \left(\frac{p}{q} N\right) n\Phi.$

(Cas particulier : moteur bipolaire et moteur imbriqué : $p = q$; $E' = n N \Phi$).

Les trois autres sont générales, donc indépendantes du type du moteur :

$P_t = E'I$: définition de la f. c. é. m ;
$U = E' + rI$: loi d'Ohm des récepteurs à f. c. é. m (moteurs...)
$P_t = 2\pi n M_t$: puissance du couple.

En combinant ces relations, et en utilisant parfois certaines approximations, on trouve les équations des caractéristiques du moteur.

2° Si dans les expressions les mieux retenues — celles du moteur bipolaire — on remplace N par $\frac{p}{q} N$, on retrouve celles du moteur multipolaire ; en effet p, q et N figurent seulement dans l'expression de la force contre-électromotrice.

E. — Exercice résolu

Un moteur à courant continu bipolaire développe sur son arbre une puissance mécanique $P_u = 1{,}5$ *kilowatt lorsque son induit absorbe un courant* $I = 6{,}28$ *ampères. L'induit porte à sa périphérie* $N = 1\,000$ *conducteurs actifs et le flux utile par pôle est* $\Phi = 0{,}020$ *weber.*

Calculer :

1° *Le moment* M_t *du couple électromagnétique.*

2° *La vitesse de rotation* n *(on confondra le couple électromagnétique et le couple utile).*

3° *La tension* U *d'alimentation si les pertes mécaniques et magnétiques sont de 100 watts et la résistance de l'induit* $r = 1{,}9$ *ohm.*

Solution.

1° Le moment du couple s'exprime en fonction de l'intensité par la relation :

$$M_t = \frac{N\Phi I}{2\pi}.$$

On a donc :

$$M_t = \frac{1\,000 \times 0{,}02 \times 6{,}28}{2 \times 3{,}14} = 20 \text{ m.N.}$$

2° La puissance utile s'exprime en fonction de la vitesse de rotation en tours par minute par la relation :

$$P_u = \frac{2\pi n M_u}{60} = \frac{\pi n M_u}{30}.$$

On en déduit la vitesse de rotation :

$$n = \frac{30\,P_u}{\pi M_u} = \frac{30 \times 1{,}5 \,.\, 10^3}{3{,}14 \times 20} \approx 716 \text{ tr/mn.}$$

3° La puissance mécanique totale est :

$$P_t = P_u + p_c = 1\,500 + 100 = 1\,600 \text{ W ;}$$

mais nous avons également :

$$P_t = E'I$$

soit

$$E' = \frac{P_t}{I} = \frac{1\,600}{6{,}28} \approx 256 \text{ V.}$$

D'où la tension d'alimentation :

$$U = E' + rI = 256 + 1{,}9 \times 6{,}28 \approx 268 \text{ V.}$$

PROBLÈME DE LA LEÇON XIII

Un constructeur donne pour un moteur la vitesse nominale : $n = 1\,150$ tours par minute, sous la tension nominale $U_n = 460$ volts. La puissance électromagnétique est alors $P_t = 7{,}8$ kilowatts et la chute d'induit $rI = 72$ volts.

1° Calculer la valeur du courant I absorbé par le moteur et la résistance r de l'induit.

2° On alimente le moteur sous une nouvelle tension $U' = 400$ volts et le courant est le même que précédemment ; déduire dans ces conditions :

a) La vitesse n' ; *b*) La puissance électromagnétique P'_t.

Réponses : 1° $I \approx 20{,}1$ A ; $r \approx 3{,}5\ \Omega$. 2° $n' \approx 972$ tr/mn ; $P_t \approx 6{,}6$ kw.

LECTURE TECHNIQUE

Le stroboscope

Définition.

C'est un appareil à source de lumière périodique ; il produit les éclairs brefs d'un tube au néon, à des intervalles de temps réguliers, réglables de quelques secondes à quelques microsecondes.

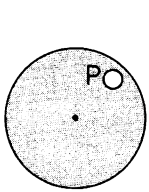
La méthode stroboscopique permet l'observation d'un mouvement périodique — tel que la rotation d'un moteur par exemple — normalement trop rapide pour que l'œil puisse en suivre les différentes phases.

Expérience.

Considérons un disque noir marqué d'une tache blanche circulaire P à sa périphérie (fig. 1).

— Un moteur lui donne une vitesse de rotation constante n tours par seconde ; éclairons-le par le stroboscope : P donne l'image d'une circonférence blanche continue.

— Augmentons progressivement le nombre des éclairs par seconde, c'est-à-dire la fréquence n' des éclairs : P semble se déplacer de plus en plus lentement dans son sens initial de rotation, puis il paraît immobile, enfin il semble repartir en sens inverse de son mouvement réel en accélérant peu à peu.



Lecture. Fig. 1.

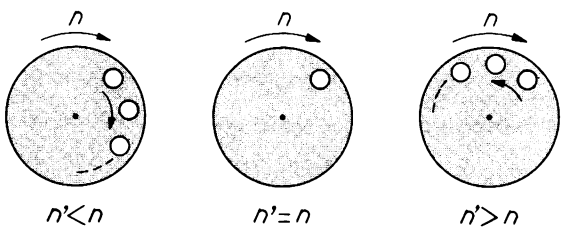


Fig. 2.

Interprétation.

Soient n le nombre de tours par seconde du disque, n' le nombre d'éclairs (fig. 2).

Si $n = n'$, P paraît immobile parce que les éclairs frappent la tache toujours à la même phase de son mouvement ; si $n' < n$, P exécute un peu plus d'un tour quand il est de nouveau éclairé : il paraît au ralenti dans le sens de son mouvement réel ; inversement si $n' > n$, P est éclairé avant d'avoir accompli un tour complet : il semble tourner en sens inverse.

Description.

Sur un stroboscope, on distingue : la lampe au néon devant son miroir de forme parabolique ; le boîtier renfermant une commande électronique de l'amorçage de la lampe au néon; sur la partie supérieure du boîtier, un disque gradué règle la fréquence des éclairs. Lorsque « l'immobilité » de l'organe à analyser est réalisée, un index donne directement sur un cadran gradué la vitesse de rotation de l'organe.

XIV. — MOTEURS A COURANT CONTINU A EXCITATION INDÉPENDANTE

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— 1 moteur $P_u = 3$ kW ; 180 V ; 18 A à vitesse variable par commande dynatrol ;
— 1 génératrice frein 3,5 kW ; 115 V ; 44 A ; 1 500 tr/mn ;
— 1 génératrice à excitation composée : $P = 5{,}5$ kW ;
— 2 rhéostats 62 Ω ; 3,5 A ;
— 1 rhéostat 11 Ω ; 8 A ;
— 1 tachymètre ;
— des masses marquées ;
— des tableaux de charge (résistances).

A. — Fonctionnement du moteur

Nous considérons, dans les § A et B, le moteur alimenté sous la *tension constante U*.

I. — MARCHE A VIDE

L'induit et l'inducteur ont leurs sources d'alimentation séparées (fig. 1).

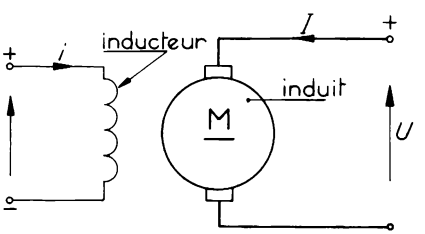


FIG. 1. — Moteur à excitation séparée : schéma de principe.

L'induit reçoit du réseau un courant sous une tension correspondant à sa tension nominale ; l'inducteur est parcouru par le courant d'*excitation* i, réglable par un rhéostat d'excitation et qui crée l'induction dans le circuit magnétique.

On dit que le moteur est à vide s'il n'exécute aucun travail mécanique, autre que celui de vaincre les frottements.

2. — MARCHE EN CHARGE

Le moteur M est accouplé mécaniquement par son arbre à une génératrice G (fig. 2). Les opérations de démarrage du moteur et d'amorçage de la génératrice étant supposées accomplies, M reçoit du réseau un courant I_M tandis que G fournit un courant I_G au circuit de charge.

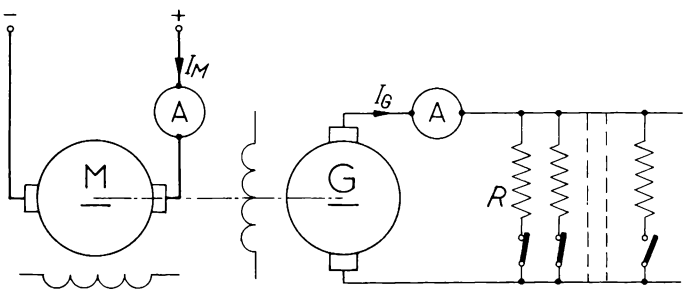


FIG. 2.

— Augmentons le débit de G en ajoutant successivement 1, 2, ..., n résistances R dans le circuit : nous observons qu'au fur et à mesure que la charge croît, l'intensité absorbée par le moteur croît : le moteur *répond automatiquement* à un accroissement de la puissance mécanique demandée par un accroissement de sa puissance absorbée.

— Notons la vitesse de M, après chaque accroissement de la charge, à l'aide d'un tachymètre ; nous observons que la vitesse diminue peu à peu : la vitesse du moteur varie donc en fonction de la charge de la génératrice.

— Continuons d'accroître la charge : à partir d'une certaine limite, des étincelles plus abondantes et plus apparentes se produisent au collecteur car le courant commuté (XI, § C) devient plus important.

3. — CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR

a) Réglage de la vitesse.

A partir de la relation $E' = nN\Phi$, la vitesse peut s'écrire :

$$n = \frac{E'}{N\Phi} = \frac{U - rI}{N\Phi},$$

expression dans laquelle la chute de tension rI est très faible devant la tension U d'alimentation ; N exprime le nombre de conducteurs actifs ; on peut donc écrire :

$$n \approx \frac{U}{N\Phi} = \frac{K}{\Phi}, \qquad K \text{ étant une constante.}$$

Il en résulte que :

— Pour une puissance mécanique donnée — c'est-à-dire I pratiquement constant — la vitesse n est inversement proportionnelle au flux inducteur Φ : le réglage de la vitesse peut donc s'effectuer en modifiant le courant d'excitation à l'aide d'un *rhéostat d'excitation.*

— La vitesse est inversement proportionnelle au flux par pôle ; le circuit d'excitation ne doit pas être interrompu, toute interruption entraînant un emballement du moteur. En particulier, *un rhéostat d'excitation doit être robuste.*

— Pour un flux constant, l'accroissement de la charge mécanique entraîne un accroissement de I ; la chute de tension rI reste faible devant U et la variation de la vitesse de rotation est peu sensible.

b) Intensité au démarrage.

La loi des récepteurs $U = E' + rI$ suppose le moteur en rotation, en régime établi. L'intensité est alors : $I = \dfrac{U - E'}{r}$. (r : résistance de l'induit entre balais).

En régime permanent, $E' \approx U$; I et rI^2 ne sont pas excessifs (échauffement normal).

Par contre, à l'instant du démarrage, l'induit n'a pas encore tourné ; sa vitesse n est nulle et par suite la f. c. é. m. $E' = nN\Phi$ aussi. Le moteur se comporte comme une résistance morte dans laquelle l'intensité serait :

$$I = \frac{U}{r}$$

très supérieure au courant admissible.

Il en résulterait :

— Pour le moteur : échauffement exagéré, accélération trop rapide endommageant l'induit.

— Pour la source d'alimentation : débit excessif qui la détériore, les fusibles sautent.

Un **rhéostat de démarrage** limite l'appel de courant au démarrage à une valeur I_D n'entraînant aucun risque de détérioration :

— Il est éliminé par une manœuvre progressive au fur et à mesure que la vitesse du moteur croît.

— La résistance totale X du rhéostat est telle que :

$$I_D = \frac{U}{X + r}.$$

Pratiquement, le rhéostat est calculé pour que I_D ne dépasse pas $1{,}5\,I_n$: la figure 3 donne l'exemple d'un schéma de montage d'un moteur à excitation séparée.

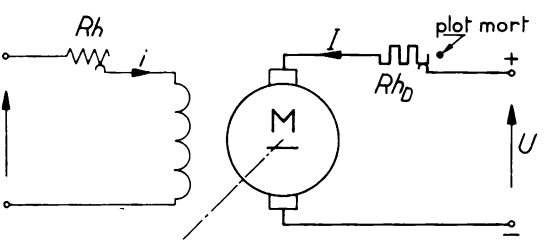


FIG. 3. — Schéma montrant le rhéostat d'excitation Rh du circuit inducteur et le rhéostat de démarrage Rh_D du circuit de puissance.

Pour le moteur type (XI, § A 1 *b*)

$$U_N = 180 \text{ V} ; \; I_N = 18 \text{ A} ; \; r = 0{,}45 \; \Omega.$$

On a :

$$I_D = 1{,}5 \times 18 = 27 \text{ A}$$

$$X = \frac{U}{I_D} - r = \frac{180}{27} - 0{,}45 \approx 6{,}2 \; \Omega,$$

alors que sans rhéostat de démarrage, on aurait :

$$I = \frac{U}{r} = \frac{180}{0{,}45} \approx 400 \text{ A} !$$

4. — SENS DE ROTATION

Après avoir pris la précaution de mettre le moteur à l'arrêt, exécutons l'une des deux opérations suivantes :

— inversons le sens du flux en inversant le sens du courant inducteur i ; dès le démarrage, nous observons que le sens de rotation s'est également inversé ;

— inversons le sens du courant I dans l'induit : au démarrage, nous observons que le sens de rotation du moteur s'est inversé.

On peut donc changer le sens de rotation d'un moteur à *excitation séparée* en inversant à la plaque à bornes, ou les connexions de l'inducteur, ou les connexions de l'induit (mais non les deux à la fois).

En effet, la force électromagnétique $F = BIl$, exercée sur chaque conducteur, s'inverse si l'on inverse $\vec{B}$ ou I.

Ceci résulte de l'expression de la force électromagnétique $F = BIl$ qui montre que le sens de la force — et donc du mouvement — dépend du sens de $\vec{B}$ et de I.

B. — Caractéristiques de fonctionnement

I. — CARACTÉRISTIQUE DE FONCTIONNEMENT A VIDE D'UN MOTEUR

Caractéristique $n = f(i)$.

C'est la courbe de variation de la vitesse n *en fonction du courant d'excitation* i, *à tension d'alimentation* U *constante.*

Elle montre que la vitesse augmente quand le courant d'excitation diminue ; cette courbe se détermine :

— en partant avec i maximal (rhéostat d'excitation éliminé) ;

— en ne dépassant pas de plus de 20 % la valeur de la vitesse normale de fonctionnement de la machine ;

— en ajoutant en série avec l'induit un rhéostat — dont la valeur dépend de la machine utilisée — pour pouvoir obtenir à vide la vitesse normale du moteur.

2. — CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT EN CHARGE

a) Caractéristique de vitesse $n = f(I)$.

C'est la courbe de la vitesse n *du moteur en fonction de l'intensité* I *du courant absorbé, à tension d'alimentation* U *et excitation* i, *constantes :*

L'expression de la vitesse, la réaction d'induit étant négligeable, s'écrit :

$$n = \frac{U - rI}{N\Phi} = -\frac{r}{N\Phi} I + \frac{U}{N\Phi}$$; elle est de la forme $y = ax + b$.

Sa représentation est une droite et sa pente est faible ; la vitesse du moteur à excitation indépendante est pratiquement constante.

EXEMPLE.

Le moteur entraîne une génératrice à excitation composée ; on fait débiter la génératrice sur un banc de charge et on relève, pour différentes valeurs de *la charge du moteur* 0, $P/4$, $P/2$, $3P/4$, P, $5P/4$, l'intensité I qu'il absorbe et sa vitesse de rotation n.

L'allure de la courbe est donnée par la figure 4.

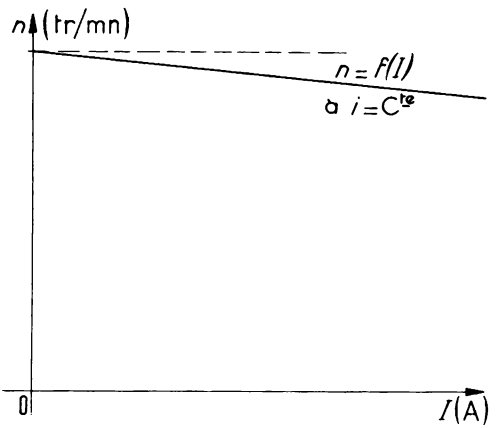


FIG. 4.

b) Caractéristiques électromécaniques du couple : $M_t = f(I)$ et $M_u = f(I)$.

— *Définition.*

Ce sont les courbes du couple électromagnétique M_t *et du couple utile* M_u *en fonction de l'intensité absorbée* I *par le moteur.*

Couple électromagnétique :

L'expression du couple électromagnétique : $M_t = \frac{N\Phi I}{2\pi}$ montre que, pour une excitation constante, le couple est directement proportionnel au courant. La variation de M_t en fonction de I est donc représentée par une droite passant par l'origine des axes de coordonnées.

Couple utile :

De la relation (p. 154) $P_u = P_t - p_c$, on déduit :

$\frac{P_u}{2\pi n} = \frac{P_t}{2\pi n} - \frac{p_c}{2\pi n}$, soit $M_u = M_t$ — constante ;

la caractéristique $M_u(I)$ se déduit de $M_t(I)$ par une translation.

— ***Relevé*** (fig. 5).

Nous avons relevé la courbe $M_u = f(I)$; à titre d'exemple, nous en donnons le détail.

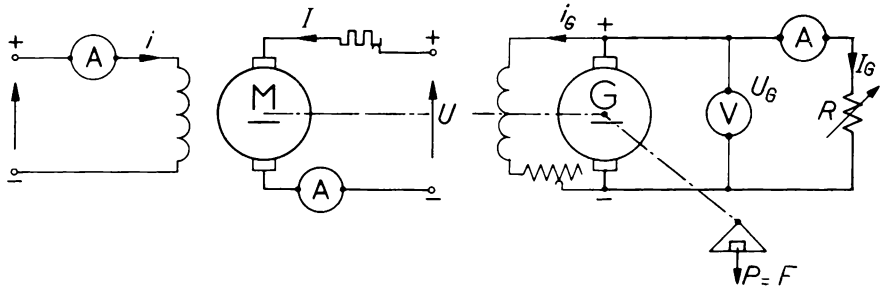
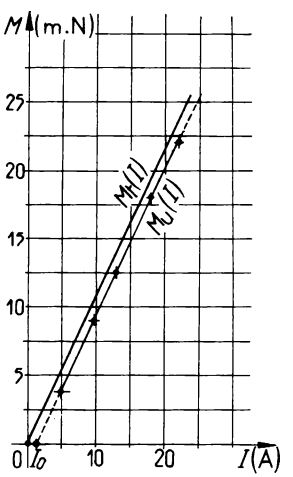


FIG. 5. — Mesure du couple utile ; R : résistance de charge permettant de régler I_o.

Le moteur M à étudier entraîne une génératrice-frein qui débite sur un banc de charge. L'inducteur de cette dernière étant monté sur roulements, le couple qui s'exerce entre l'induit et l'inducteur tend à entraîner celui-ci dans le sens de rotation de l'induit. Un bras de levier de longueur l solidaire de l'inducteur porte un plateau dans lequel on dispose des masses marquées pour équilibrer le couple dont la valeur est $M_u = F \times l$.



Nous avons utilisé le matériel suivant :

— un moteur : $P_u = 3$ kW ; $U_n = 180$ V ; $I_n = 18$ A à courant redressé à vitesse variable de 75 à 1 500 tr/mn ; excitation séparée : 200 V ; 0,7 A ;

— une génératrice frein : $P_u = 3{,}5$ kW, 115 V, 44 A ; 1 500 tr/mn.

FIG. 6. — Caractéristique électromécanique $M = f(I)$. M_u (I) est peu inférieur au couple M_f (I) et coupe l'axe des intensités au point de courant à vide I_o.

— ***Résultats numériques et courbe*** (fig. 6).

I_G (A)	U_G (v)	U (v)	I (A)	i (A)	$F = P$ (N)	l (m)	$M_u = Fl$ (mN)
0	120	162,5	5	0,7	7,6	0,5	3,8
5,7	—	—	9,75	—	17,6	—	8,8
10,6	—	—	13,1	—	24,8	—	12,4
16,7	—	—	17,9	—	36,0	—	18,0
21,2	—	—	21,5	—	43,8	—	21,9

c) **Caractéristique mécanique : $M = f(n)$.**

C'est la courbe du couple utile en fonction de la vitesse, à tension d'alimentation constante.

On la déduit des deux courbes précédentes : $n = f(I)$ et $M = f(I)$; c'est une droite : la figure 7 en donne l'allure.

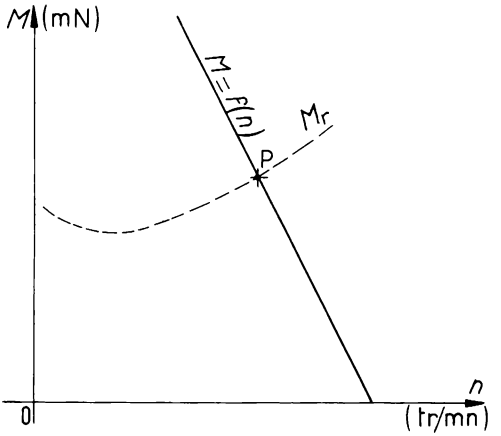


FIG. 7. — Caractéristique mécanique $M = f(n)$. En pointillés, la courbe du couple résistant.

REMARQUE.

Connaissant la courbe du moment M_r du couple *résistant* de la machine utilisatrice (machine-outil, laminoir...) en fonction de n, et la caractéristique mécanique M du moteur d'entraînement, leur intersection fournit le point de fonctionnement P puisque le couple moteur est égal au couple résistant (fig. 7). Pour un couple M_r donné, le moteur doit être choisi pour que P corresponde à ses conditions nominales de fonctionnement.

C. — Alimentation sous tension variable d'un moteur à excitation indépendante

Beaucoup de moteurs sont alimentés sous tension d'alimentation constante; toutefois, dans certaines industries — d'extraction, de fabrication, de transformation — le besoin d'utiliser une large gamme de vitesses a conduit à des procédés nouveaux de réglage : par la tension d'alimentation aux basses vitesses; par le courant d'excitation aux vitesses élevées.

I. — RÉGLAGE DE LA VITESSE PAR ACTION SUR LA TENSION D'ALIMENTATION

a) **Principe.**

Rappelons les expressions :

— de la vitesse : $$n = \frac{E'}{N\Phi} \approx \frac{U}{N\Phi} \qquad (1)$$

— du couple électromagnétique : $$M_t = \frac{N\Phi I}{2\pi}. \qquad (2)$$

En réalisant I et Φ constants *pendant le démarrage*, ces deux relations prennent les formes suivantes :

$$n = \frac{U}{K} \qquad (1)'$$

$$M_t = K' \qquad (2)'$$

K et K' étant deux constantes.

Dans ce cas, la vitesse ne dépend plus que de la tension U et le couple demeure constant. Depuis $n = 0$ jusqu'à la vitesse nominale, la vitesse est devenue une fonction linéaire de la tension ; elle augmente proportionnellement à la tension sans surintensité nécessitant un rhéostat de démarrage.

b) **Réalisation.**

Pratiquement, on réalise Φ constant en laissant le courant d'excitation i invariable, et I constant à l'aide d'un *limiteur d'intensité* (1) ; ce procédé de réglage est dit *par commande de la tension à flux constant :* il est réservé aux faibles vitesses (inférieures à la vitesse nominale du moteur) nécessaires aux opérations de mise en place et d'approche du travail.

Pendant longtemps l'alimentation d'un moteur à tension variable a été réalisée par groupe tournant (Ward-Léonard) (2) : la variation de vitesse est obtenue par variation de la tension d'induit, réalisée elle-même par action sur l'excitation de la génératrice d'alimentation à courant continu complétant le groupe tournant. Aujourd'hui, les procédés de réglage de la tension sont réalisés par des redresseurs contrôlés au silicium (thyristors) (1).

2. — RÉGLAGE DE LA VITESSE PAR ACTION SUR L'EXCITATION

Nous avons vu (§ A 3) que la vitesse d'un moteur à courant continu est modifiée en agissant sur le flux inducteur : en particulier, si l'on diminue le flux, la vitesse augmente et le couple diminue.

Ce procédé de réglage, dit *à tension d'induit constante*, est réservé à l'obtention de vitesses supérieures à la vitesse nominale ; il est pratiqué pour les opérations de *finition* et de *retours rapides.*

La figure 8 donne le diagramme de fonctionnement d'un moteur à tension variable.

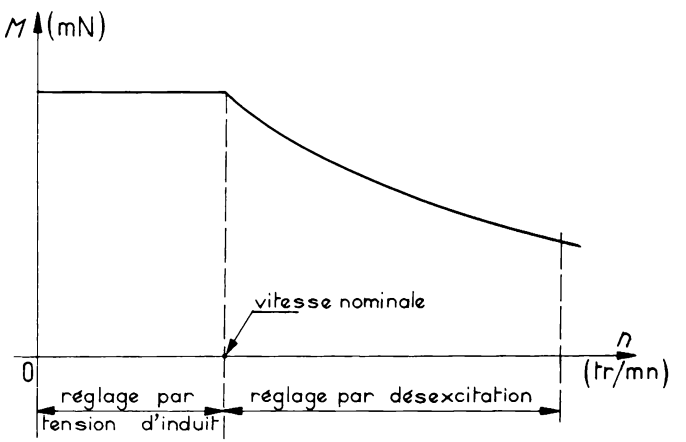


FIG. 8. — Diagramme du fonctionnement d'un moteur à tension variable.

(1) *Redressement*, par MOUNIC (Édit. Foucher).
(2) *Lecture technique.*

D. — Emploi du moteur à excitation séparée

Il est utilisé :

— dans la sidérurgie : les laminoirs, en particulier, nécessitent des variations de couples et de vitesses importantes ;

— dans les mines : appareillages nécessitant une sécurité absolue ;

— dans la marine : entraînement des hélices, des pompes, exigeant une gamme de vitesses importante.

Il trouve son emploi : associé aux groupes Ward-Léonard, aux commandes par variateur de vitesse ; également dans les servomécanismes et l'excitation des alternateurs.

E. — Exercice résolu

Un moteur à courant continu porte sur sa plaque signalétique les indications suivantes :
Induit : $U_n = 220\ V$; $I_n = 14\ A$; $n = 1\,500\ tr/mn$; $r = 1\ \Omega$.
Inducteur : $U = 220\ V$; $R = 200\ \Omega$.

Il est monté en excitation séparée et fonctionne en régime normal ; la réaction magnétique d'induit est négligeable et les pertes constantes évaluées à $p_c = 100$ *watts. Calculer :*

1° *Le rendement* η *du moteur.*

2° *Le couple utile* M_u.

Solution.

1° Le rendement d'un moteur est le quotient de la puissance utile (sur l'arbre) par la puissance absorbée :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

a) Force contre-électromotrice : $E' = U - rI = 220 - 1 \times 14 = 206$ V.

b) Puissance mécanique totale : $P_t = E'I = 206 \times 14 = 2\,884$ W.

Puissance utile : $P_u = P_t - p_c = 2\,884 - 100 = 2\,784$ W.

c) Pertes dans l'induit : $p_1 = rI^2 = 1 \times 14^2 = 196$ W.

Pertes dans l'inducteur : $p_2 = Ri^2 = 200 \times \left(\frac{220}{200}\right)^2 = 200 \times 1{,}1^2 = 242$ W.

d) Puissance totale absorbée : $P_a = P_u + p_1 + p_2 + p_c$.
$= 2\,784 + 196 + 242 + 100 = 3\,322$ W.

e) Rendement : $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{2\,784}{3\,322} \approx 0{,}84$.

2° Moment du couple : $P_u = M_u\,\omega = M_u \frac{\pi\, n}{30}$.

$$: M_u = \frac{30\,P_u}{\pi \,.\, n} = \frac{30 \times 2\,784}{3{,}14 \times 1\,500} \approx 18 \text{ m . N.}$$

PROBLÈMES DE LA LEÇON XIV

1. Un moteur à courant continu, à excitation indépendante fonctionne à charge normale. Ses caractéristiques sont les suivantes :

Inducteurs :

— alimentés sous tension constante $U = 240$ volts ;

— résistance $r = 400$ ohms.

Induit :

— alimenté sous tension constante $U = 240$ volts ;

— résistance $r' = 1{,}5$ ohm ;

— intensité dans l'induit : 16 ampères ;

— vitesse de rotation : 2 400 tours par minute.

La réaction magnétique d'induit étant négligeable, calculer :

1° L'intensité i dans les inducteurs.

2° La résistance du rhéostat de démarrage pour limiter l'intensité à la valeur $I_d = 1{,}5\, I_n$.

3° La force contre-électromotrice, la puissance mécanique totale développée P_t ainsi que le couple moteur correspondant M_t.

4° La puissance utile sur la poulie, ainsi que le couple utile correspondant, sachant que les pertes mécaniques et magnétiques p_c sont évaluées à 256 watts.

5° Le bilan des puissances et la puissance totale absorbée P_a.

6° Le rendement global du moteur η_M.

(C. A. P. Électromécanicien, 1967.)

Réponses : 1° $i = 0{,}60$ A.

2° $R_D = 8{,}5\ \Omega$.

3° $E' = 216$ V ; $P_t = 3\,456$ W ; $M_t = 13{,}75$ m.N.

4° $P_u = 3\,200$ W ; $M_{vu} = 12{,}73$ m.N.

5° p_1 inducteur $= 144$ W ; p_2 induit $= 384$ W ; $p_c = 256$ W ; P_a absorbée $= 3\,984$ W.

6° $\eta_M = 0{,}80$.

2. Une machine à courant continu à excitation séparée a donné aux essais les résultats suivants :

— Résistance r de l'induit : 0,80 ohm ;

— F. é. m. en génératrice, à la vitesse $n = 1\,500$ tours par minute : $E = 75$ V, 103 V, 115 V, 123 V, respectivement pour des courants d'excitation $i = 0{,}5$ A, 0,75 A, 1 A, 1,25 A.

On fait fonctionner cette machine en moteur, accouplé à une machine-outil, sous une tension $U = 120$ volts : l'induit absorbe 20 ampères et sa vitesse est 1 400 tours par minute.

On demande de calculer :

a) Le couple total développé M_t et l'intensité du courant d'excitation i_1 dans ces conditions.

b) Le courant I absorbé par l'induit et le courant d'excitation i_2 pour une vitesse de rotation $n = 1\,800$ tours par minute, en supposant constant le couple résistant de la machine entraînée. (La vitesse $n' = 1\,800$ tr/mn étant obtenue par réglage de l'excitation.)

Nota : On ne tiendra compte que des pertes calorifiques dans l'induit.

(C. A. P. Électromécanicien.)

Réponses : a) $M_t = 14{,}2$ **m.N ;** $i = 0{,}94$ **A ; b)** $I = 27{,}3$ **A ;** $i_2 = 0{,}56$ **A.**

3. Un moteur à courant continu à excitation séparée constante est alimenté sous une *tension continue U, réglable* par un procédé électronique (1).

Le courant dans l'inducteur est réglé à la valeur $i = 0{,}78$ ampère sous une tension $u = 220$ volts. L'induit, de résistance $r = 1{,}2$ ohm, est parcouru par un courant $I = 3{,}6$ ampères : dans ces conditions, sous la tension $U = 137$ volts, le moteur tourne à la vitesse $n = 1\,240$ tours par minute.

A) On demande :

1° La f. c. é. m. E' du moteur.

2° La puissance électromagnétique P_t.

3° Le couple électromagnétique M_t.

4° Le couple utile M_u sur l'arbre si les pertes mécaniques et les pertes fer à la vitesse de l'essai sont $p = 95{,}5$ watts.

5° La valeur de la constante $K\,\Phi = \dfrac{E'}{n}$.

B) On utilise le moteur à couple utile M_u constant et on admet que la somme des pertes mécaniques et des pertes fer est proportionnelle à la vitesse :

a) Montrer que lorsque la vitesse varie, le courant d'induit I et le couple électromagnétique demeurent constants.

b) Calculer les vitesses en tours par minute correspondant aux tensions d'alimentation 46, 90 et 160 volts.

Réponses : A) 1° $E' \approx 133$ **V ;**

2° $P_t \approx 478$ **W ;**

3° $M_t = 3{,}7$ **mN ;**

4° $M_u \approx 2{,}9$ **mN ;**

5° $K\Phi \approx 6{,}41$.

B) b) 390 tr/mn ; $\approx$ **800 tr/mn ;** $\approx$ **1 460 tr/mn.**

(1) Commande par variateur électronique.

LECTURE TECHNIQUE

Groupe Ward-Léonard

C'est un système comportant (fig. 1) :

— Un moteur M_1, de travail, à courant continu.

— Une génératrice G à courant continu.

— Un moteur M_2, d'entraînement, à courant alternatif ou continu.

Il permet d'obtenir le réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu (M_1) *par variation continue de la tension U* à ses bornes.

Le principe de fonctionnement est le suivant :

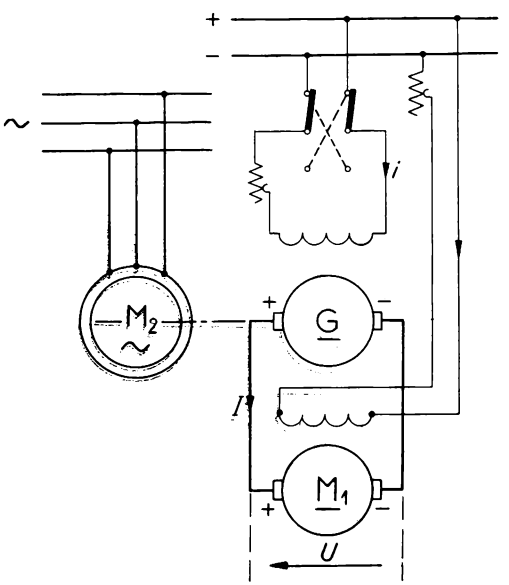
M_2 entraîne à vitesse constante la génératrice G qui alimente l'induit du moteur M_1. L'accroissement de la vitesse de M_1 est obtenue par l'accroissement de sa tension d'induit U, elle-même obtenue en augmentant le courant d'excitation de G. Les excitations de G et M_1 sont séparées ; celle de M_1 est en outre maintenue constante et à sa plus grande valeur pour en obtenir un couple mécanique maximal.

Les avantages du groupe Ward-Léonard sont :

— Une gamme de vitesses très large pour le moteur de travail.

— Une facilité de démarrages fréquents en charge, à tension réduite, sans rhéostat de démarrage ni surintensité.

— La commande d'une grande puissance — celle du moteur de travail — par le réglage d'une petite puissance consommée par l'inducteur de la génératrice G ; la génératrice est employée comme *amplificateur de puissance.*



Les inconvénients sont :

— La nécessité de trois machines tournantes.

— Le rendement faible du groupe.

Le groupe Ward-Léonard est surtout utilisé en sidérurgie, dans les mines (trains de laminoirs, monte-charge...) ; mais il est peu à peu remplacé par les variateurs électroniques à commande par thyristors.

Lecture. Fig. 1.

XV. — MOTEUR A AUTO-EXCITATION

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— 1 moteur « série » : $P = 5{,}5$ kW ; $U_n = 110$ V ; $I_n = 60$ A ; $n = 1\,400$ tr/mn ;
— 1 génératrice : $P = 5{,}5$ kW ; $U_n = 120$ V ; $I_n = 58$ A ; $n = 1\,500$ tr/mn ;
— 1 moteur « composé » : $P = 5{,}5$ kW ; $U_n = 120$ V ; $I_n = 60$ A ; $n = 1\,400$ tr/mn ;
— 1 voltmètre ; 1 ampèremètre avec shunt ; 1 tachymètre ; 1 rhéostat de démarrage ;
— 1 rhéostat d'excitation; des tableaux de charges.

Ils peuvent être à excitation en dérivation (§ A), à en excitation série (§ B), à excitation composée (§ C).

A. — Moteur à excitation en dérivation

1. — PRINCIPE

L'induit et l'inducteur — les mêmes que ceux du moteur à excitation séparée — sont alimentés *en dérivation* (1) par la *même source*, sous *tension constante* ; le schéma de principe est celui de la figure 4 (XIII, § A 3).

2. — MONTAGE PRATIQUE

Nous savons (XIV, § A) qu'il existe plusieurs conditions à remplir pour le fonctionnement d'un moteur :

— Nécessité d'un rhéostat de démarrage : il protège l'induit, dont la résistance est faible, contre la surintensité de démarrage.

— Nécessité d'un rhéostat d'excitation : il permet le réglage de la vitesse de rotation du moteur ; au démarrage, le flux doit être maximal pour obtenir un couple suffisant pour un courant acceptable dans l'induit et éviter l'emballement du moteur.

Par ailleurs, à l'ouverture du circuit inducteur, une force électromotrice d'auto-induction importante se manifeste, nuisible aux appareils de coupure.

(1) On dit encore *moteur « shunt »*.

Le montage ***anti-inductif*** est, pour ces raisons, le montage industriel du moteur à excitation en dérivation ; il se présente de la manière suivante (fig. 1) :

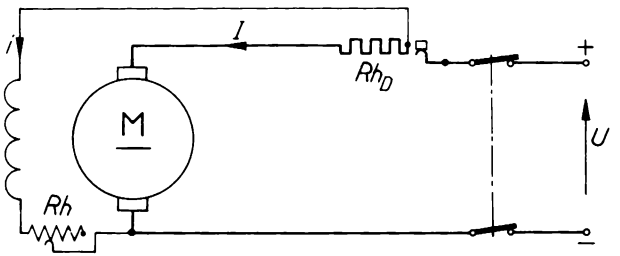


FIG. 1. — Moteur à excitation en dérivation : montage anti-inductif.

L'inducteur est en parallèle sur l'induit et la totalité du rhéostat de démarrage, de façon à réaliser un circuit fermé ; dans ces conditions :

— dès que le curseur du rhéostat de démarrage, quittant le plot mort, attaque le premier plot, la tension totale est appliquée simultanément à l'inducteur et à l'induit ;

— à la coupure, l'effet d'auto-induction est atténué par les éléments du circuit fermé dans lequel il se produit alors.

REMARQUE.

Le rhéostat Rh_D de démarrage dont le détail est donné par la figure 2 a une résistance globale qui ne dépasse pas quelques ohms.

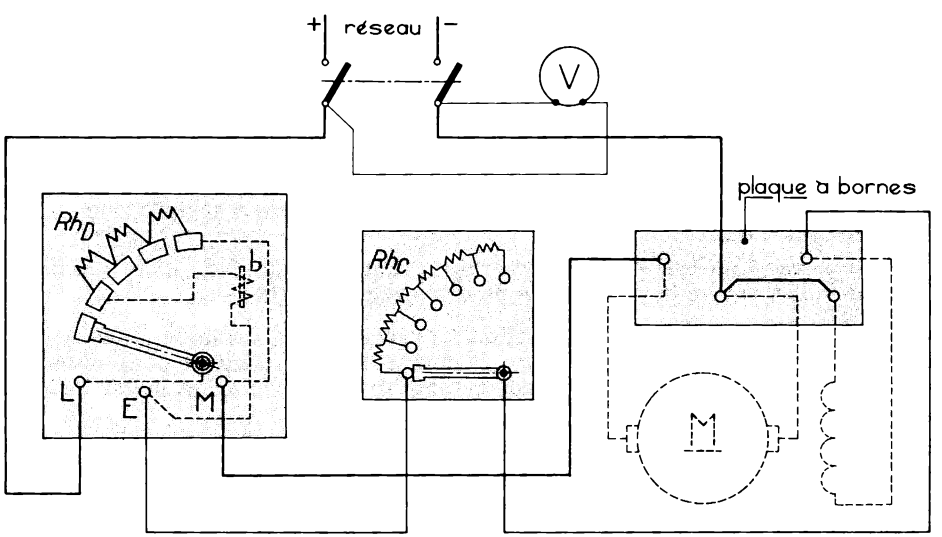


FIG. 2. — Moteur « dérivation » : schéma de détail. (*En pointillé* : les éléments cachés.)

— En passant progressivement d'un plot à un autre sur le rhéostat de démarrage, on accroît la vitesse ; notons que la résistance — faible — du circuit d'induit, diminue et que la résistance — forte — du circuit inducteur reste pratiquement inchangée.

— En manœuvrant le rhéostat, en sens inverse, on entraîne l'arrêt du moteur sans risque d'interruption du circuit inducteur.

Deux grosses bornes, l'une marquée L (ligne), l'autre M (moteur) précisent les liaisons au circuit de puissance, une troisième, intermédiaire et plus petite, *E* (excitation) indique la connexion au circuit inducteur.

Enfin le rhéostat de démarrage est muni d'un électro-aimant b parcouru par le courant d'excitation : il permet le « collage » de la manette de Rh_D et protège le moteur contre une interruption ou une diminution trop grande du courant dans le circuit d'excitation : ce dispositif constitue un disjoncteur à *minimum de courant.*

3. — SENS DE ROTATION

La figure 3 montre :

— que le sens du courant dans l'enroulement inducteur est le même, pour une même polarité aux balais, dans une machine à excitation dérivation fonctionnant en génératrice ou en moteur : le sens de la rotation est donc le même dans ces deux cas ;

— que l'inversion du sens de marche du moteur à excitation dérivation ne peut se faire en modifiant les polarités de l'alimentation : il faut inverser soit le sens du courant dans l'inducteur, soit le sens du courant dans l'induit.

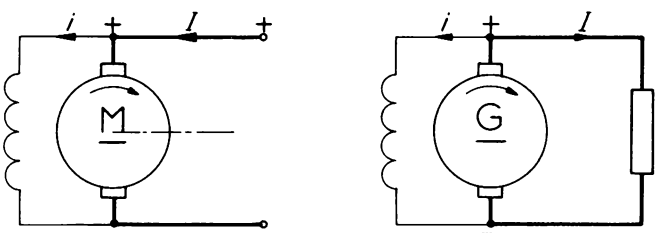


FIG. 3. — Moteur dérivation — Génératrice dérivation : pour un même sens de rotation en moteur et en génératrice, et un même sens de *i*, les courants d'induit sont de sens contraires.

4. — CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT

Un moteur à excitation dérivation est un moteur à excitation indépendante dont l'enroulement inducteur est soumis à la même tension que l'induit ; en conséquence :

— Les caractéristiques sont pratiquement semblables à celles du moteur à excitation indépendante.

a) **Caractéristique de vitesse : $n = f(I)$.** (XIV, § B2)

b) **Caractéristique électromécanique** (XIV, § B2)

Les expressions du moteur à excitation indépendante lui sont applicables. Seule modification, si I est le courant total absorbé, i le courant dans l'inducteur, le courant dans l'induit s'écrit $I - i$ (fig. 4).

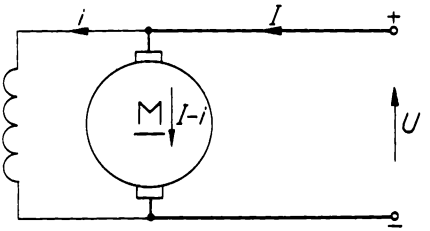


FIG. 4.

5. — BILAN DES PUISSANCES

— Puissance absorbée au réseau : $P_a = UI$ (I courant total d'alimentation).

P_a se répartit en :

— pertes par effet Joule dans l'induit de résistance r : $r\,(I - i)^2$;
— pertes par effet Joule dans le circuit inducteur de résistance R : $Ri^2 = Ui$;
— puissance transformée dans l'induit en puissance électromécanique :
$P_t = E'\,(I - i) = M_t\,\omega$.

P_t se répartit en :

— pertes mécaniques (frottement, ...) : p_f ;
— pertes magnétiques (Foucault, hystérésis) : p_F ;
leur somme $p_f + p_F$ constitue les pertes dites *constantes* p_c ;
— puissance utile sur l'arbre : $P_u = P_t - p_c$.

6. — UTILISATION

Le moteur à excitation en dérivation est utilisé pour sa faible variation de vitesse en fonction de la charge ; c'est le moteur type convenant à l'entraînement des machines-outils.

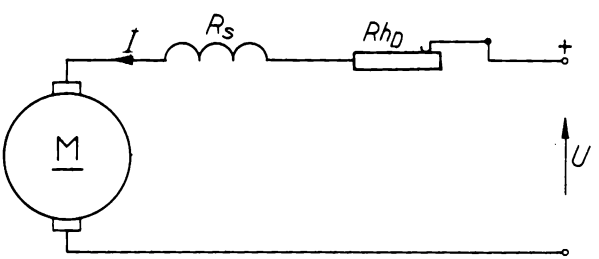


FIG. 5. — Moteur série : schéma ; Rh_D : rhéostat de démarrage ; R_s : bobines inductrices.

B. — Moteur à excitation en série

1. — PRINCIPE ET MONTAGE

Les bobines inductrices sont en série avec l'induit. Ainsi le courant dans l'inducteur et dans l'induit est le même ; de ce fait, les bobines inductrices sont constituées d'un petit nombre de spires de gros fil pouvant supporter le courant total I d'alimentation du moteur.

Le moteur série est alimenté par l'intermédiaire d'un rhéostat de démarrage (fig. 5) et l'inversion du sens de rotation est obtenu en inversant les connexions, soit de l'induit, soit de l'inducteur.

2. — CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT SOUS TENSION CONSTANTE

a) **Caractéristique de vitesse** (fig. 6).

Reprenons la relation générale :

$$n = \frac{U - rI}{N\Phi}.$$

Il faut noter que r représente, dans le cas du moteur série, la somme des résistances de l'induit et de l'inducteur.

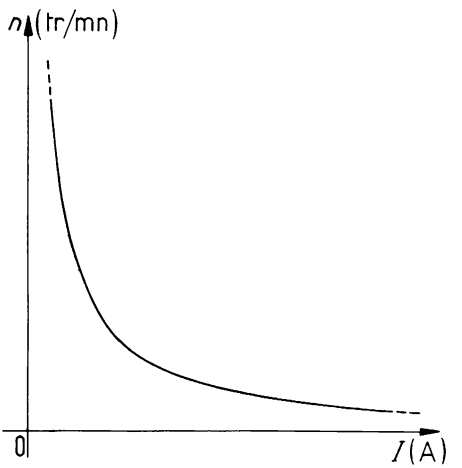


FIG. 6. — Moteur « série » : caractéristique de vitesse $n = f(I)$. Le moteur s'emballe à vide.

Aux faibles charges (valeurs faibles du courant) :

Le terme rI est petit devant la tension U ; on a $n \approx \frac{U}{N\Phi}$. Par ailleurs, le circuit magnétique n'étant pas saturé, le flux inducteur est sensiblement proportionnel au courant absorbé, soit $\Phi = kI$.

En définitive, l'expression de la vitesse peut s'écrire, K étant une constante :

$$n \approx \frac{U}{NkI} \approx \frac{K}{I}.$$

La vitesse est donc inversement proportionnelle au courant I absorbé.

Ce qui implique que si le moteur est à vide, I est faible, n devient très grand : le moteur série s'emballe s'il n'est pas accouplé à une machine opposant un couple résistant.

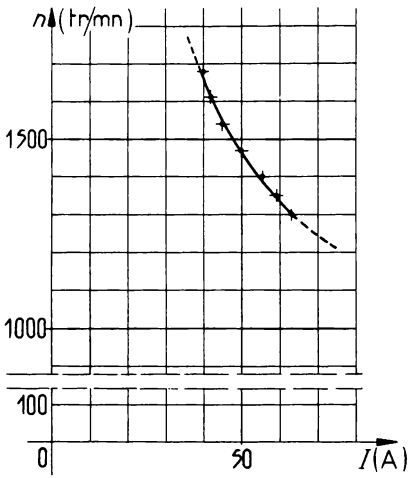
Aux fortes charges (valeurs fortes du courant) :

Le courant absorbé est grand; c'est aussi le courant inducteur : le circuit magnétique se sature, Φ croît plus lentement que I et la vitesse varie moins que ne l'indique l'expression $n = K/I$ valable aux faibles charges.

La caractéristique de vitesse $n = f(I)$ a l'allure donnée par la figure 6.

Essai réalisé.

Moteur série utilisé : $P = 5{,}5$ kW ; $U_n = 110$ V ; $I_n = 60$ A ; $n = 1\,400$ tr/mn. Le moteur série entraînait une génératrice à excitation composée ; nous avons fait décroître la charge de la génératrice et relevé les valeurs correspondantes de I et n du moteur série.



$U_{(V)}$	$I_{(A)}$	$n_{(tr/mn)}$
119	63	1 300
—	59,5	1 350
—	55,5	1 400
—	50	1 470
—	45	1 540
—	42	1 620
—	39,5	1 680

Nous avons obtenu la courbe de la figure 7.

FIG. 7. — Moteur série : caractéristique de vitesse $n = f(I)$ relevée à l'essai.

REMARQUE.

Le réglage de la vitesse d'un moteur série peut être obtenu dans des limites étroites en plaçant un rhéostat aux bornes de l'inducteur ; ce rhéostat permet de dériver une partie du courant débité hors de l'inducteur.

b) **Caractéristique électromécanique du couple.**

Aux faibles charges : l'expression générale du couple s'écrit, puisque $\Phi = kI$ (pas de saturation du circuit) :

$$M_t = \frac{N\Phi I}{2\pi} = \frac{N}{2\pi} kI^2 \text{ de la forme } M_t = KI^2.$$

Le couple est proportionnel au carré de l'intensité du courant absorbé.

Aux fortes charges : le circuit magnétique se sature ; le flux Φ varie peu et le couple est sensiblement proportionnel au courant :

$$M_t = \left(\frac{N\Phi}{2\pi}\right) I.$$

Avec l'approximation indiquée p. 155, l'allure du couple $M = f(I)$ est donnée par la figure 8.

Un moteur série a un couple moteur important, particulièrement au démarrage, puisque Φ est alors maximal, comme I.

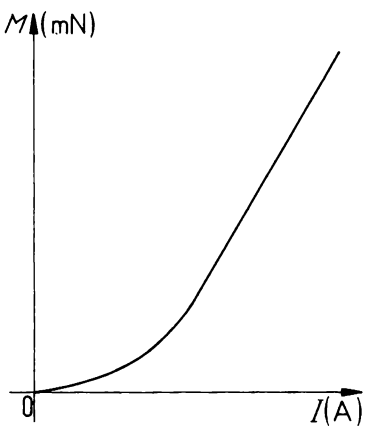


FIG. 8. — Moteur série : caractéristique du couple $M = f(I)$.

3. — CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT SOUS TENSION VARIABLE

Grâce à des éléments redresseurs récents (thyristors), il est facile d'alimenter les moteurs par une tension continue réglable. Ce type d'alimentation est de plus en plus répandu pour les moteurs à excitation en série de traction (S. N. C. F.) ; leur vitesse est alors réglable dans de larges limites.

La relation $M_t = KI^2$ du paragraphe précédent est encore valable.

4. — BILAN DES PUISSANCES

Puissance absorbée : $P_a = UI$.

P_a se répartit en :

— pertes par effet Joule dans l'induit et l'inducteur : $p_1 = rI^2$ (r résistance totale induit + inducteur) ;

— puissance transformée en puissance mécanique dans l'induit : $P_t = E'I \approx M_u\,\omega$ (E', f. c. é. m. ; ω, vitesse angulaire du moteur).

P_t se répartit en :

— pertes mécaniques (frottements...) : p_f.

— pertes magnétiques (Foucault, hystérésis) : p_F.

— puissance disponible sur l'arbre : $P_u = P_t - p_f - p_F = P_t - p_c$.

5. — UTILISATION

Le moteur série est recherché pour son fort couple au démarrage : c'est avant tout le moteur de la traction électrique ; il est utilisé aussi pour l'appareillage de levage (grues, ponts roulants...) et pour démarrer les moteurs à explosion. Notons que les véhicules électriques sont équipés de façon à utiliser le moteur série en génératrice dans le *freinage avec récupération d'énergie.*

C. — Moteur à excitation composée

1. — PRINCIPE

Le moteur à excitation composée possède les enroulements série et dérivation que nous avons observés sur la génératrice « composée » (fig. 9).

— L'enroulement fil fin est soumis à la tension d'alimentation U.

— L'enroulement gros fil est monté en série avec l'induit et le rhéostat de démarrage.

Suivant l'importance donnée à l'un plutôt qu'à l'autre des enroulements, ce moteur sera à prédominance « série » ou « dérivation ».

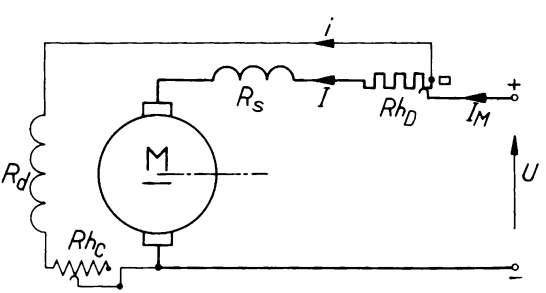


FIG. 9. — Moteur « composé » à flux additifs (Rh_D : rhéostat de démarrage).

2. — MONTAGE

a) **A flux additifs** (le plus utilisé).

Les deux enroulements produisent des flux de même sens.

— **Aux faibles charges.**

L'enroulement « dérivation » est prépondérant, le moteur se rapproche d'un moteur dérivation.

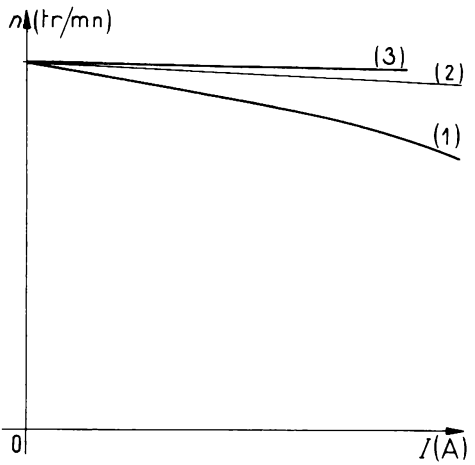
Le moteur ne s'emballe pas et le couple au démarrage est plus élevé que pour un moteur « dérivation » normal.

— **Aux fortes charges.**

L'enroulement « série » prédomine : la vitesse diminue davantage que pour un moteur à excitation en dérivation.

b) **A flux soustractifs.**

Le montage est peu utilisé parce que le fonctionnement est instable aux fortes charges.



L'enroulement série permet de compenser la variation de vitesse en charge d'un moteur fonctionnant en dérivation : la vitesse du moteur est plus constante.

La figure 10 donne l'allure des caractéristiques de la vitesse $n = f(I)$ comparée à celle d'un moteur à excitation en dérivation.

FIG. 10. — Moteur « composé » : caractéristique $n = f(I)$.

(1) en flux additifs ;
(2) même machine : enroulement série en court-circuit ;
(3) en flux soustractifs.

c) **Exemple numérique : n = f (I).**

Moteur utilisé : $P = 5{,}5$ kW ; $U_n = 110$ V ; $I_n = 60$ A ; $n = 1\,400$ tr/mn ; monté en flux additifs et entraînant une génératrice « composée » également en flux additifs. (Résistance induit : $r = 0{,}17\ \Omega$; résistance inducteur série : $r' = 0{,}07\ \Omega$; résistance de l'inducteur dérivation : $R \approx 70\ \Omega$.)

Nous avons relevé les mesures suivantes pour le moteur :

U (V)	I (A)	n (tr/mn)
115	8,25	1 560
—	14,5	1 520
—	29,5	1 450
—	45	1 400
—	61,5	1 320
—	65	1 310

Court-circuitons l'inducteur série pour le dernier point, la vitesse croît ; on lit $n = 1\,500$ tr/mn.

3. — UTILISATION

Ce moteur convient aux appareillages de grande inertie ou démarrant en charge avec un couple résistant important.

D. — Exercice résolu

Un moteur à excitation en dérivation absorbe un courant I = *13,6 ampères sous une tension* U = *220 volts et sa vitesse de rotation est* n = *1 500 tours par minute.*

La résistance de l'induit est r = *1,1 ohm, celle de l'inducteur* R = *200 ohms. Calculer :*

1° *L'intensité du courant dans l'induit.*

2° *La résistance du rhéostat de démarrage nécessaire pour limiter dans l'induit, à l'instant du démarrage, l'intensité à la valeur* $I_D = 2\ I$.

3° *La force contre-électromotrice du moteur.*

4° *La puissance électromagnétique.*

5° *Le couple moteur.*

Solution.

1° Courant dans l'inducteur :

$$i = \frac{U}{R} = \frac{220}{200} = 1{,}1\ \text{A},$$

Courant dans l'induit :

$$I - i = 13{,}6 - 1{,}1 = 12{,}5\ \text{A}.$$

2° Résistance R_D du rhéostat de démarrage :

$$R_D + r = \frac{220}{2 \times 13{,}6} \approx 8{,}1\ \Omega.$$

d'où

$$R_D = 8{,}1 - 1{,}1 = 7\ \Omega.$$

3° Force contre-électromotrice du moteur :

$$E' = U - r\,(I - i) = 220 - 1{,}1 \times 12{,}5 = 206{,}2 \approx 206\ \text{V}.$$

4° Puissance électromagnétique :

$$P_t = E'\,(I - i) = 206{,}2 \times 12{,}5 \approx 2\,580\ \text{W}.$$

5° Couple moteur (voir pp. 154-155) :

$$P_t = M \times \frac{\pi N}{30}$$

d'où

$$M = \frac{30\,P_t}{\pi N} = \frac{30 \times 2\,580}{3{,}14 \times 1\,500} \approx 16\ \text{m.N}.$$

PROBLÈMES DE LA LEÇON XV

1. Un moteur à excitation en dérivation absorbe à pleine charge un courant $I = 61{,}1$ ampères sous une tension à ses bornes $U = 110$ volts et sa vitesse de rotation est $n = 1\,500$ tours par minute.

La résistance à chaud de l'induit est $r = 0{,}25$ ohm et celle de l'inducteur $R = 100$ ohms.

Calculer, pour ce régime de fonctionnement :

1° La puissance utile P_u, sachant que les pertes mécaniques et magnétiques mesurées sont $p_c = 80$ watts.

2° Le rendement η du moteur.

3° Le couple utile M_u sur l'arbre.

Réponses : 1° $P_u = 5{,}6$ kW; 2° $n \approx 0{,}83$; 3° $M_u \approx 35{,}8$ m.N.

2. Dans un atelier, on utilise un tracteur électrique qui possède deux moteurs série alimentés en dérivation, chacun de puissance utile $P_u = 5$ kilowatts, rendement $\eta = 0{,}80$, résistance interne $r = 0{,}80$ ohm, et une batterie d'accumulateurs au plomb de 125 éléments en série, de capacité utile 450 ampères-heures. A la décharge, la tension moyenne est de 2,0 volts par élément, la quantité d'électricité utile représente 75 % de celle fournie à la charge.

On demande de calculer :

1° La tension U aux bornes des moteurs.

2° La puissance absorbée P_a par chaque moteur.

3° L'intensité absorbée I par les deux moteurs à pleine charge.

4° La f. c. é. m. E' de chacun des moteurs à pleine charge.

5° Pour chaque moteur, la puissance perdue p (autre que les pertes par effet Joule).

6° L'intensité du courant de charge I_c de la batterie, sachant qu'il faut 10 heures pour recharger la batterie complètement déchargée.

7° Le temps t pendant lequel le véhicule peut rouler sans recharge.

(C. A. P. Électromécanicien ; Paris, 1969.)

Réponses : 1° $U = 250$ V; 2° $P_a = 6\,250$ W; 3° $I = 50$ A; 4° $E' = 230$ V; 5° $p = 750$ W; 6° $I_c = 60$ A; 7° $t = 9$ h.

3. Un moteur à excitation en dérivation, sous tension constante $U = 360$ volts, absorbe en marche normale un courant $I = 50$ ampères, pour une puissance utile $P_u = 14\,720$ watts, à la vitesse $n = 1\,360$ tours par minute. Les résistances mesurées à chaud sont : pour l'induit 0,5 ohm, pour l'inducteur 180 ohms. La réaction magnétique d'induit est négligeable.

1° Quelle est la valeur du couple utile M_u en charge normale ?

2° La charge ayant augmenté, le moteur absorbe un courant $I' = 60$ ampères ; quel est le nouveau couple moteur M'_u ? (On confondra le couple utile sur l'arbre et le couple électromagnétique.)

3° Quelle est la vitesse n' correspondant à cette nouvelle charge ?

(D'après B. E. I., 1962.)

Réponses : 1° $M_u = 103$ m.N; 2° $M'_u = 124$ m.N; 3° $n' = 1\,340$ tr/mn.

4. Un moteur à excitation composée courte dérivation fonctionnant à pleine charge sous une tension $U = 120$ volts, à la vitesse $n = 2\,000$ tours par minute, fournit une puissance utile $P_u = 5{,}9$ kilowatts. Le rendement du moteur est $\eta = 0{,}80$ et les résistances sont respectivement 0,10 ohm pour l'induit, 0,040 ohm pour l'enroulement série, 54 ohms pour l'enroulement dérivation. Calculer

a) Le courant total I absorbé par le moteur.

b) Les courants dans l'enroulement dérivation et dans l'induit.

c) La force contre-électromotrice E'.

d) La somme des pertes mécaniques et des pertes magnétiques p_c.

e) Le couple moteur utile M_u.

f) La valeur de la résistance du rhéostat de démarrage pour que le courant ne dépasse pas au démarrage 1,5 fois la valeur du courant normal en charge.

(Brevet professionnel.)

Réponses : a) $I \approx 61{,}5$ A ; b) $i = 2{,}2$ A ; $I - i = 59{,}3$ A ; c) $E' \approx 111{,}6$ V ; d) $p_c \approx 718$ W ; e) $M_u \approx 28$ m.N ; f) $R_d \approx 1{,}2\ \Omega$.

5. Un moteur à excitation composée courte dérivation est alimenté sous une tension $U = 220$ volts. Les résistances mesurées à chaud des enroulements sont : enroulement dérivation $R = 54$ ohms, enroulement série $R_s = 0{,}040$ ohm, induit $R_i = 0{,}10$ ohm.

Sachant que la puissance mécanique est $P_u = 5\,900$ watts et le rendement du moteur $\eta = 0{,}80$:

1° Calculer :

a) Le courant total absorbé ; les courants dans l'inducteur et dans l'induit.

b) La f. c. é. m.

2° Établir le bilan des pertes.

(D'après Brevet professionnel.)

Réponses : 1° a) $I \approx 33$ A ; $i \approx 4$ A ; $I - i = 29$ A ; b) $E' = 215$ V. 2° $p_R \approx 864$ W ; $p_{Ri} \approx 43{,}6$ W ; $p_{Rt} \approx 84$ W ; pertes totales $p' \approx 1\,177$ W ; $p_m + p_F = 186$ W.

6. Suite du problème n° 3, p. 147 et 148.

3e partie (C) :

Cette génératrice est utilisée en moteur absorbant 10 ampères sous 220 volts ; sa vitesse de rotation est 1 200 tours par minute et sa résistance interne $r' = 0{,}5$ ohm.

Calculer :

1° La force contre-électromotrice E' du moteur.

2° La puissance mécanique P_m.

3° Le couple moteur M_u.

4° Le flux induit Φ par pôle, sachant que l'induit porte 300 conducteurs actifs.

Réponses : C) 1° $E' = 195$ V ; 2° $P_m = 1\,950$ W ; 3° $M_u = 15{,}5$ m.N ; 4e $\Phi = 32$ mWb.

LECTURE TECHNIQUE

Freinage électrique

La réversibilité des machines à courant continu permet le freinage électrique.

1° Principe.

L'énergie cinétique du moteur [1] — après interruption de son circuit d'alimentation — est mise à profit pour fournir une énergie électrique en faisant fonctionner le moteur en génératrice : le couple électromagnétique du moteur devient un couple résistant qui réalise le freinage ; l'énergie électrique fournie est dissipée dans des résistances (freinage rhéostatique) ou retournée au réseau (freinage par récupération).

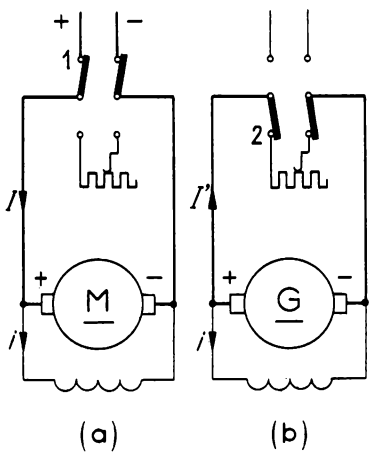
2° Modes de freinage.

a) Freinage rhéostatique.

Il s'effectue par introduction graduelle de *résistances* dans le circuit de l'induit, le moteur étant amorçé en génératrice, et permet un freinage efficace.

Si le moteur est à excitation en dérivation (fig. 1), l'induit est déconnecté en basculant l'interrupteur de la position 1 sur la position 2 : l'excitation est inchangée, le moteur s'amorce en génératrice et débite alors un courant dans des *résistances d'absorption* (grilles de fonte) ; le couple de freinage est proportionnel à ce courant.

Si le moteur est à excitation en série, le principe est le même, mais pour que l'amorçage en génératrice ait lieu, il faut changer le sens du courant d'excitation en inversant les connexions entre induit et inducteur série.



Lecture. Fig. 1.

b) Freinage par récupération.

L'énergie électrique du moteur fonctionnant en génératrice n'est plus dissipée et perdue dans des résistances, mais *renvoyée au réseau* d'alimentation.

Ceci nécessite :

— que la f. é. m. E du moteur fonctionnant en génératrice soit supérieure à la tension U du réseau ; pratiquement cela implique que la vitesse de rotation en génératrice soit plus grande que celle en moteur : c'est le cas des locomotives électriques dans les régions de grande pente, d'où son application au freinage des trains ;

— que les polarités entre génératrice et réseau soient les mêmes ; ceci est réalisé par le sens du courant d'excitation : il est inchangé dans le cas du moteur dérivation ; dans le cas du moteur série, il faut encore inverser les connexions entre induit et inducteur.

(1) En outre, en traction électrique, l'énergie cinétique du véhicule (train...).

XVI. — RENDEMENT DES MACHINES A COURANT CONTINU

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL :

— 1 moteur ≈ 3 kW ; $U_n = 180$ V ; $I_n = 18$ A ; $n = 1\,500$ tr/mn à vitesse variable, à courant redressé.
— 1 génératrice-frein = 4,8 kW ; $U_n = 110$ V ; $I_n = 44$ A ; $n = 1\,500$ tr/mn.

A. — Rendement d'une génératrice ou d'un moteur

1. — DÉFINITION DU RENDEMENT

C'est le rapport de la puissance utile P_u à la puissance absorbée P_a :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}.$$

— Pour une génératrice :

La puissance utile est la puissance électrique qu'elle fournit au circuit de charge; la puissance absorbée est la puissance mécanique qu'elle reçoit, sur son arbre, du moteur qui l'entraîne.

— Pour un moteur :

La puissance utile est la puissance mécanique disponible sur son arbre ; la puissance absorbée est la puissance électrique qu'il reçoit du réseau qui l'alimente. Dans les deux cas, la différence $p = P_a - P_u$ représente les pertes *réelles* (totales).

2. — BILAN DES PERTES DANS UNE MACHINE A COURANT CONTINU

Pour la même vitesse et le même flux, les pertes sont les mêmes, qu'une machine fonctionne en moteur ou en génératrice; le bilan donné pour un moteur (fig. 9, p. 155) donne un aperçu de ces pertes. Certaines dépendent de la charge (pertes variables), d'autres en sont indépendantes (pertes constantes ou pertes à vide).

a) **Pertes variables (ou pertes dues à la charge).**

Ce sont les pertes par effet Joule dans les enroulements de l'induit et de l'inducteur série; ordre de grandeur : 2 % de la puissance absorbée, chacune, à pleine charge. La perte dans un inducteur en dérivation varie peu avec la charge (2 % de P_a).

b) **Pertes constantes p_c.**

C'est la somme des pertes mécaniques et des pertes magnétiques.

— *Pertes mécaniques :*

Elles sont dues aux frottements divers (arbre sur ses paliers, ventilation...).

— *Pertes magnétiques* ou *pertes dans le fer :*

Elles proviennent des phénomènes d'hystérésis et des courants de Foucault dans les masses métalliques de la machine soumises à un flux variable. On voit qu'elles ne dépendent que de la vitesse, non de la charge : elles sont donc constantes *à vitesse donnée* (ou peu variable) et à excitation donnée. On mesure les pertes constantes par un *essai à vide* (p. 185).

c) **Pertes supplémentaires.**

C'est l'excès des pertes *réelles* (totales) sur la somme des pertes *mesurables* séparément (1).

B. — Méthodes de mesure du rendement d'un moteur

Nous nous limiterons aux deux plus usuelles :

— une méthode *indirecte*, celle des pertes séparées ;

— une méthode *directe*, celle de la génératrice-frein.

I. — MÉTHODE DES PERTES SÉPARÉES

a) **Principe.**

On évalue, par des mesures purement électriques, les pertes totales p dans le moteur pour un régime donné ; il suffit de mesurer :

— la résistance r de l'induit ;

— les pertes constantes par un *essai à vide.*

Cette méthode ne nécessite *aucun essai en charge ;* elle est donc économique (matériel, énergie) ; d'ailleurs les constructeurs n'auraient pas de sources d'énergie suffisantes pour réaliser les essais en charge de grosses unités (2).

Le rendement est alors exprimé de la façon suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - p}{P_a} \qquad \text{ou} \qquad \boxed{\eta = 1 - \frac{p}{P_a}.}$$

b) **Mode opératoire.**

— *Pertes par effet Joule dans l'induit.*

On mesure à chaud, au voltmètre et à l'ampèremètre, la résistance r de l'induit (machine à l'arrêt) ; les pertes par effet Joule dans l'induit seront calculées par l'expression rI^2, I étant le courant dans l'induit pour la charge considérée.

---

(1) Elles sont calculées par les constructeurs (méthode des pertes séparées).

(2) La méthode des pertes séparées s'applique aussi aux alternateurs, aux transformateurs, aux redresseurs.

— *Pertes dans l'inducteur.*

On les calcule par les expressions :

- pour l'excitation séparée : Ui (i courant d'excitation) ;
- — — en dérivation : $U_n i$;
- — — en série : $R_s I^2$ (I courant à travers l'inducteur série R_s).

— *Pertes constantes* (ou *à vide*).

On entraîne le moteur *à vide* à *excitation séparée*, dans les conditions de vitesse et d'induction correspondant à la charge pour laquelle on veut connaître le rendement ; ceci nécessite :

- d'appliquer à l'induit une tension U' égale à la f. c. é. m. E' en marche normale ($E' = U_n - rI_n$) ;
- de régler l'excitation pour réaliser la même vitesse qu'en charge.

D'où les pertes constantes :

$$p_c = E'I_0 - rI_0^2, \quad I_0 \text{ étant le courant à vide.}$$

En général $I_0 \ll I$ et par suite $rI_0 \ll E'$; on peut donc admettre $p_c \approx E'I_0$.

c) Exemple numérique.

— Moteur à excitation en dérivation : valeurs nominales $U_n = 115$ V ; $I_n = 58$ A ; $n = 1\,500$ tr/mn ; excitation i réglée à 1,0 A.

Proposons-nous de déterminer le rendement pour le régime nominal ; on opérerait de façon analogue pour $\frac{P}{4}$, $\frac{P}{2}$, $\frac{3P}{4}$, $\frac{5P}{4}$ afin de tracer la courbe du rendement.

— *Mesures :*

- Résistance de l'induit : $r = 0{,}3\ \Omega$.
- Essai à vide sous la tension : $E' = U - rI = 115 - 0{,}3 \times 58 \approx 98$ V ; $I_0 = 5{,}2$ A.

— *Calcul du rendement :*

- Pertes constantes : $p_c = E'I_0 - rI_0^2 = 98 \times 5{,}2 - 0{,}3 \times 5{,}2^2 = 500$ W
- Pertes dans l'induit : $p_1 = rI^2 = 0{,}3 \times 58^2 \approx 1\,000$ W
- Pertes dans l'inducteur : $p_2 = U_n i = 115 \times 1 = 115$ W
- Pertes totales : $p = p_c + p_1 + p_2 = 500 + 1\,000 + 115 = 1\,615$ W
- Puissance totale absorbée : $P_a = U_n I_n = 115 \times 58 = 6\,670$ W
- Rendement du moteur : $\eta = 1 - \frac{p}{P_a} = 0{,}758 \approx 76\,\%$

d) L'incertitude est plus petite sur le rendement que sur les pertes.

Supposons une erreur — surestimée — de 10 % sur l'évaluation des pertes p ; on trouve pour 10 % en plus, soit $p = 1\,615 \times 1{,}1 = 1\,776$, un rendement :

$$\eta = 1 - \frac{p}{P_a} = 1 - \frac{1\,776}{6\,670} \approx 0{,}734 ;$$

Une erreur de 10 % sur les pertes modifie le rendement de 75,8 — 73,4 = 2,4 % seulement.

L'erreur relative sur le rendement est beaucoup plus faible que l'erreur relative sur les pertes ; notons que cette erreur, dans le cas numérique considéré, est un maximum, car les rendements des moteurs modernes dépassent 80 %.

2. — MÉTHODE DE LA GÉNÉRATRICE-FREIN

a) Principe.

On mesure :

— le couple utile M_u du moteur par un *procédé mécanique*, d'où la puissance utile :

$$P_u = 2\pi n M_u.$$

— la puissance absorbée : $P_a = UI$ (au voltmètre et à l'ampèremètre). (Si l'excitation est séparée, notons qu'il s'y ajoute la puissance Ui.)

On déduit le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{2\pi n M_u}{UI}.$$

b) Mode opératoire.

On utilise une génératrice-frein (ou dynamo-balance) :

C'est une génératrice dont les inducteurs sont montés sur roulements et peuvent pivoter autour de leur axe entre deux butées limites ; à la rotation de l'induit, le couple qui s'exerce entre l'induit et l'inducteur tend à entraîner celui-ci dans le sens de rotation de l'induit ; un bras de levier de longueur l, solidaire de l'inducteur, porte un plateau dans lequel on place des masses marquées exerçant une force F.

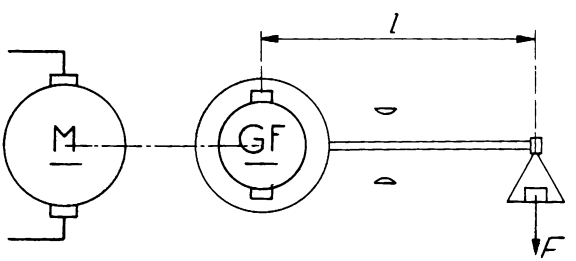


FIG. 1. — Génératrice-frein.

Le moteur à étudier est accouplé à la génératrice-frein GF débitant sur un banc de charge ; lorsque la charge de GF varie. la puissance absorbée par le moteur varie.

A l'équilibre, le moment M_u du couple utile est égal au moment du couple mécanique Fl :

$$\boxed{M_u = Fl}$$

M_u en mètre-newton.
F en newton.
l en mètre.

L'expression de la puissance utile du moteur s'écrit alors :

$$P_u = 2\pi\, nFl.$$

c) Exemple numérique.

Moteur M : $U_n = 180$ V ; à excitation séparée ; $I_n = 18$ A ; $n = 1\,500$ tr/mn.
Génératrice GF : $U_n = 120$ V ; $I_n = 44$ A ; $n = 1\,500$ tr/mn.

Nous avons obtenu les résultats suivants (indices G : génératrice, M : moteur) :

$I_{G\,(A)}$	$U_{G(V)}$	I_{iM} (A)	i_M (A)	$I = I_{iM} + i_M$ (A)	$U_{M(V)}$	F (N)	l (m)	$M_u = Fl$ (mn)	n (tr/mn)	P_u (W)	P_a (W)	η
0	120	5	0,7	5,7	162,5	7,7	0,5	4,95	1 500	740	926	0,79
5,75	—	9,75	—	10,45	—	18,3	—	9,15	1 450	1 382	1 690	0,82
21,2	—	22	—	22,7	—	44	—	22	1 400	3 220	3 688	0,86

I somme des courants dans l'induit I_{iM} et l'inducteur i_M du moteur. U_M tension appliquée à l'inducteur et à l'induit.

REMARQUES.

— En augmentant le nombre de mesures, on peut tracer la courbe $\eta = f(P_u)$; elle passe par un maximum très plat.

— On démontre — et on constate expérimentalement — que ce maximum augmente avec la puissance de la machine.

C. — Génératrice : méthode des pertes séparées

1. — PRINCIPE

On évalue, par des mesures électriques, les pertes p de la génératrice.
Si P_a est la puissance absorbée au régime considéré et P_u la puissance utile, le rendement s'exprime par l'expression :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + p}.$$

2. — MODE OPÉRATOIRE

Il n'y a pas d'essai en charge.

— Les pertes variables sont évaluées comme pour un moteur (§ B).

— Les pertes constantes s'obtiennent par un essai à vide. On fait fonctionner la génératrice à vide, en moteur, à excitation séparée et on règle l'excitation pour obtenir, à vitesse normale, une f. c. é. m. égale à la f. é. m. E de la génératrice ; la tension appliquée à l'induit est $U' = E = U_n + rI_n$.

Si I_0 est le courant à vide, les pertes constantes sont :

$$p_c = EI_0 - rI_0^2 \approx EI_0.$$

D. — Exercices résolus

1. *Une génératrice-frein débitant sur un banc de charge est entraînée par un moteur à excitation indépendante dont on veut mesurer le rendement ; dans ce but, on a relevé les mesures suivantes :*

Moteur : *tension appliquée* U = *162,5 volts ; intensité absorbée* I = *21,3 ampères ; vitesse de rotation* n = *1 440 tours par minute.*

Enroulement inducteur : *tension appliquée* U = *162,5 volts ; intensité d'excitation* i = *0,70 ampère.*

Génératrice frein : *longueur du bras de levier* l = *0,50 mètre ; poids nécessaire à l'équilibre* P = *42,6 newtons.*

Calculer le rendement du moteur dans les conditions de l'expérience.

Solution.

Puissance absorbée par le moteur : $P_a = U\,(I + i) = 162{,}5 \times 22 = 3\,575$ W.

Couple mécanique : $Pl = 42{,}6 \times 0{,}5 = 21{,}3$ m.N.

Puissance utile : $P_u = Pl \cdot \dfrac{\pi\, n}{30} = 21{,}3 \times 3{,}14 \times \dfrac{1\,440}{30} = 3\,210$ W.

Rendement : $\eta = \dfrac{P_u}{P_a} = \dfrac{3\,210}{3\,575} \approx 0{,}90.$

2. *Une génératrice de rendement* $\eta_G = 0{,}80$ *fournissant un courant* $I_G = 10$ *ampères sous une tension* $U_G = 24$ *volts est entraînée par un moteur à courant continu.*

Sachant que le moteur a un rendement $\eta_M = 0{,}82$ *et que sa tension est* $U_M = 220$ *volts, calculer l'intensité* I_M *du courant qu'il absorbe.*

Solution.

Soient :

P_{aM} la puissance absorbée et P_{uM} la puissance utile du moteur.

P_{aG} la puissance absorbée et P_{uG} la puissance utile de la génératrice.

On a : $$I_M = \frac{P_{aM}}{U}$$

mais $$P_{aM} = \frac{P_{uM}}{\eta_M}$$

$$P_{uM} = P_{aG} = \frac{P_{uG}}{\eta_G}$$

$$P_{uG} = U_G I_G.$$

On a donc :

Puissance utile de la génératrice : $P_{uG} = 24 \times 10 = 240$ W.

Puissance utile du moteur : $P_{uM} = \dfrac{240}{0{,}80} = 300$ W.

Puissance absorbée par le moteur : $P_{aM} = \dfrac{300}{0{,}82} = 366$ W.

Intensité : $I_M = \dfrac{366}{220} \approx 1{,}7$ A.

PROBLÈMES DE LA LEÇON XVI

1. Un réservoir d'eau de 200 mètres cubes doit être rempli par une pompe électrique qui élève l'eau à une hauteur de 6 mètres ; le réservoir est plein en 4 heures. Le rendement de la pompe est de 75 % et celui du moteur électrique 85 %.

a) Quelle doit être la puissance mécanique P_u du moteur ?

b) Quelle est la puissance absorbée P_a par le moteur ?

(Extrait C. A. P. Électricité, 1968.)

Réponses : a) $P_u = 1\,088$ W ; b) $P_a = 1\,280$ W.

2. A) Un moteur à excitation dérivation entraînant une génératrice a donné aux essais les résultats suivants :

U (V)	I (A)	i (A)	n (tr/mn)
134	9,2	1,7	1 700
»	15	»	1 700
»	29	»	1 675
»	45	»	1 670
»	60	»	1 650
»	71	»	1 650

U étant la tension aux bornes de l'induit du moteur, I l'intensité totale absorbée, i le courant d'excitation, n la vitesse de rotation. De plus, les résistances mesurées à chaud des enroulements sont : pour l'induit $r_i = 0{,}2$ ohm, pour l'inducteur R = 77 ohms.

Tracer la caractéristique de vitesse $n = f(I)$ du moteur.

B) On veut mesurer le rendement du moteur par la méthode des pertes séparées lorsqu'il absorbe un courant $I = 60$ ampères.

1° Dans ce but, on réalise un essai à vide.

a) Quelle est la tension U_0 à appliquer au moteur ? Quelle doit être la vitesse n_0 correspondante ?

b) Quelle est la valeur des pertes constantes p_c (mécaniques et magnétiques), si le courant absorbé à vide est $I_0 = 5$ ampères ?

2° Déduire le rendement η du moteur pour la charge ci-dessus $I = 60$ A.

Réponses : B) 1° a) $U_0 = 122$ V ; $N_0 = 1\,650$ tr/mn ; b) $p_c = 605$ W ; 2° $\eta \approx 0{,}85$.

3. En utilisant le tableau des essais en charge du problème n° 2 :

1° Calculer, aux différentes charges, le rendement du moteur par la méthode des pertes séparées, sachant que le courant absorbé dans l'essai à vide est $I_0 = 5$ ampères.

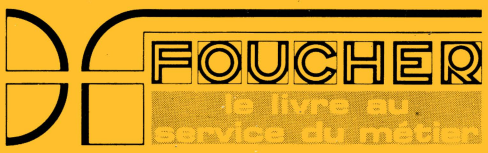
2° Tracer la courbe du rendement en fonction de la puissance utile : $\eta = f(P_u)$.

Réponses : 1° $\eta \approx 0{,}40$; 0,57 ; 0,75 ; 0,80 ; 0,85 ; 0,81.

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli — Paris (1er)
N° 3350-276

Imprimé en France.

LA NÉOGRAVURE (Crété, Desfossés), PARIS
61198-2-76
Dépôt légal : 3e trimestre 1970


FOUCHER
le livre au
service du métier